

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера

Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Профиль Машины и аппараты химических производств

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы	
Проект реактора для получения полипропилена	

УДК 678.742.002.023.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Полонский Максим Сергеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская М.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Штейнле А.В.	К.М.Н.		

По разделу «Конструктивно-механический раздел»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Краснокутская Е.А.	Д.Х.Н., профессор		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять базовые математические, естественнонаучные, социально-экономические и специальные знания в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-1,2,3,19,20), Критерий 5 АИОР (п.1.1)
Р2	Применять знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов и оборудования химической технологии, нефтехимии и биотехнологии для решения производственных задач	Требования ФГОС (ПК-4,5,9,15 ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2)
Р3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.	Требования ФГОС (ПК-4,5,8,11, ОК-2,4), Критерий 5 АИОР (пп.1.2)
Р4	Проектировать и использовать новое энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-8,11,23,24), Критерий 5 АИОР (п.1.3)
Р5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-1,4,5,19-22, ОК-7,10), Критерий 5 АИОР (п.1.4)
Р6	Осваивать и эксплуатировать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность и надежность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-6,12,13,14,17, ОК-3,4,8), Критерий 5 АИОР (п.1.5)
Р7	Применять знания по проектному менеджменту для ведения инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности	Требования ФГОС (ПК-3, 8, 9, 10, 11, 12, 13), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р8	Использовать современные компьютерные методы вычисления, основанные на применении современных эффективных программных продуктов при расчете свойств материалов, процессов, аппаратов и систем, характерных для профессиональной области деятельности; находить необходимую литературу, использовать компьютерные базы данных и другие источники информации	Требования ФГОС (ПК-4, 5, 9, 10, 11, 14)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
Р9	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,6-10), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
Р10	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-6,7,8), Критерий 5 АИОР (2.6)
Р11	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-11) , Критерий 5 АИОР (п.2.2)
Р12	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ОК-3,4,5,12) , Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера

Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Профиль Машины и аппараты химических производств

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера

_____ Е.А. Краснокутская
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4К41	Полонский Максим Сергеевич

Тема работы:

Проект реактора для получения полипропилена	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	21.02.2018 №1198/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).	<i>Объектом исследования является химический реактор со встроенным теплообменником и перемешивающим устройством для синтеза полипропилена марки 21020, высший сорт (ГОСТ 26996-86).</i> <i>1. Производительность по продукту, т/год – 6200;</i> <i>2. Состав сырья: гептан-растворитель, пропилен (высший сорт), едкий натр (20%), титан трёххлористый микросферический, раствор диэтилалюминийхлорида, водород;</i> <i>3. Продукт: полипропилен марки 21020, высший сорт (ГОСТ 26996-86);</i> <i>4. Способ организации процесса: непрерывный;</i> <i>5. Годовой фонд рабочего времени, дн – 333.</i>
---	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	<div>1. Обзор литературы</div> <div>2. Технологическая схема установки по производству полипропилена</div> <div>3. Технологические расчеты реактора для синтеза полипропилена</div> <div>4. Выбор конструкционных материалов</div> <div>5. Механический расчет реактора синтеза полипропилена</div> <div>6. Поверочный расчет реактора синтеза полипропилена</div> <div>7. Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена</div> <div>8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</div> <div>9. Социальная ответственность</div> <div>10. Заключение</div> <div>11. Список публикаций студента</div> <div>12. Список использованных источников</div> <div>13. Приложение А</div>
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<div>1. Технологическая схема (А1)</div> <div>2. Реактор. Вид обций (А0)</div> <div>3. Реактор. Сборочные единицы (А1)</div>
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская Марина Витальевна
Социальная ответственность	Штейнле Александр Владимирович
Конструктивно-механический раздел	Беляев Василий Михайлович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22.02.2018
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Полонский Максим Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4К41	Полонский Максим Сергеевич

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Н. М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	МАХП

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Использование информации, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Проведение оценки экономической эффективности исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская Марина Витальевна	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Полонский Максим Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4К41	Полонский Максим Сергеевич

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	МАХП

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объектом исследования является химический реактор с гладкой теплообменной рубашкой и перемешивающим устройством, применяющийся для производства полипропилена.</i>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – опасность поражения электрическим током (источники, средства защиты) 	<p><i>1.1 Наиболее вредный фактор на производстве – наличие в воздухе рабочей зоны паров вредных химических соединений.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – природа фактора – химическая; – дано описание действия вредных веществ, действовавших в производстве, на организм человека при вдыхании, попадании на кожу, в глаза и проглатывании; – в качестве средства коллективной защиты выбрана правильно организованная система вентиляции; – в качестве средств индивидуальной защиты рекомендованы респираторы и противогазы, прорезиненные костюмы, перчатки, фартуки. <p><i>1.2 Опасные производственные факторы на производстве:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – вращающиеся механизмы (перемешивающее устройство, необходимо соблюдение техники безопасности при эксплуатации); – высокая температура теплоносителей (греющий пар, поступающий в рубашку; необходимо использовать индивидуальные средства защиты – перчатки и костюмы, предотвращающие ожоги); – поражение электрическим током (неисправные электросети, незаземлённое оборудование, на котором может скапливаться статическое электричество; необходимо соблюдение техники безопасности при работе с электроприборами и организация заземления для отвода статического электричества).
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); 	<p><i>2 В соответствии с нормами по охране окружающей среды необходимо предусмотреть следующие решения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – оборудование реактора предохранительными клапанами,

<ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>организация факельного коллектора для сжигания выбросов (защита атмосферы);</p> <ul style="list-style-type: none"> – создание установки для локальной очистки сточных вод, а также воды, использованной для мытья полов и промывки аппаратов (защита гидросферы); – организация отвала для вывоза твёрдых осадков полипропилена, получаемых при чистке и ремонте оборудования.
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>3 В качестве возможных чрезвычайных ситуаций для производства определены: пожар, взрыв, химическая авария.</p> <p>В качестве наиболее типичной ЧС выбран пожар. Даны рекомендации по предупреждению ЧС, порядок действий при возникновении ЧС и мер по ликвидации её последствий.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>4 В соответствии с Трудовым кодексом Российской Федерации даны рекомендации по обеспечению компенсаций работникам вредного производства.</p> <p>Предложен закрытый тип компоновки производства. Дан перечень помещений производственного и общественного назначения, необходимых на предприятии. Даны рекомендации по организации эвакуационных выходов.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Штейнле А.В.	К.М.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4K41	Полонский Максим Сергеевич		

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа состоит из графической части и пояснительной записки, была выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013 при помощи системы компьютерной алгебры MathCad, графическая часть выполнена в программе Компас 2016. Графическая часть состоит из двух листов формата A1 и одного листа формата A0. Пояснительная записка состоит из 163 страниц, содержит 17 таблиц, 26 рисунков, основана на 77 источниках литературы.

Ключевые слова: реактор с мешалкой и гладкой рубашкой, полипропилен, полимеризация, пропилен, суспензия.

Объектом разработки является реактор с перемешивающим устройством и гладкой рубашкой для синтеза полипропилена методом полимеризации в суспензии.

Цель работы – расчет и выбор реактора синтеза полипропилена, который будет удовлетворять всем условиям технологического процесса. Производительность ректора по целевому продукту 6200 т/год.

Произведены материальный, тепловой, конструктивный и механический расчеты. Разработана технологическая схема и конструкция основного реактора. В конструктивно-механическом расчете были произведены расчеты толщин стенок обечайки, крышки и днища, элементов рубашки, штуцеров, фланцевых соединений, а также расчет вала перемешивающего устройства на прочность, жесткость и вибростойкость. Рассчитано шпоночное соединение.

Область применения: предприятия в области промышленного органического синтеза.

Экономическая значимость работы: разработанный реактор является наиболее оптимальным средством для проведения реакции полимеризации полипропилена в суспензии тяжелого растворителя (гептана).

ABSTRACT

Bachelor's work consists of a graphic part and an explanatory note and was executed in the text editor Microsoft Word 2013 using the computer algebra system MathCad, the graphic part is executed in the program "Компас-3D 2016". The graphic part consists of 2 sheets of A1 format and 1 sheet of A0 format. The explanatory note consists of 163 pages, contains 17 tables, 26 figures and was based on 77 sources of literature.

Keywords: reactor with a stirrer and a smooth jacket, polypropylene, polymerization, propylene, suspension.

The object of development is a reactor with a mixing device and a smooth jacket for the synthesis of polypropylene by polymerization in suspension.

The purpose of the work is to calculate and select a polypropylene synthesis reactor that will satisfy all the conditions of the technological process. The capacity of the reactor for the target product is 6200 tons per year.

Material, thermal, constructive and mechanical calculations were made. The technological scheme and design of the main reactor have been developed. In the constructive-mechanical calculation, the wall thicknesses of the shell, cover and bottom, jacket's elements, fittings, flange connections were calculated, and the shaft of the agitator was calculated for strength, rigidity and vibration resistance. A keyed connection was calculated.

Scope: enterprises in the field of industrial organic synthesis.

Economic significance of the work: the developed reactor is the most optimal mean for carrying out the polymerization reaction of polypropylene in a suspension of a heavy solvent (heptane).

Оглавление

Введение	14
1 Обзор литературы	16
1.1 Исходное сырьё для производства полипропилена	17
1.2 Способы получения полипропилена	17
1.3 Масштабы производства и обзор рынка полипропилена	18
1.4 Области применения полипропилена	19
1.5 Выбор аппаратного оформления и технологической схемы	20
2 Технологическая схема установки по производству полипропилена	22
2.1 Физико-химические закономерности синтеза полипропилена	22
2.1.1 Термодинамика процесса синтеза полипропилена	22
2.1.2 Механизм процесса полимеризации полипропилена	23
2.1.3 Катализаторы, применяемые при синтезе полипропилена	24
2.1.4 Кинетика процесса синтеза полипропилена	25
2.2 Описание технологической схемы производства полипропилена	25
2.3 Рекомендации по автоматизации процесса полимеризации	26
3 Технологические расчёты реактора для синтеза полипропилена	28
3.1 Материальный баланс реактора синтеза полипропилена	28
3.2 Гидродинамический расчет аппарата с внутренними устройствами	31
3.3 Тепловой баланс реактора для синтеза пропилена	36
3.4 Конструктивный расчёт реактора синтеза полипропилена	41
3.5 Расчёт тепловой изоляции реактора синтеза полипропилена	42
3.5 Выводы по результатам технологических расчётов	43
4 Выбор конструкционных материалов	45
4.1 Расчёт основных характеристик материала	46
4.2 Заключение по выбору конструкционных материалов	48
4.3 Определение прибавок к толщине на различные разрушения	49
4.4. Выводы по выбору конструкционных материалов	49
5 Механический расчет реактора синтеза полипропилена	51
5.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки	51
5.2 Расчёт толщины стенки эллиптических днища и крышки	54
5.3 Расчёт толщины стенки гладкой теплообменной рубашки	58
5.4 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища	63
5.5 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища	69

5.6	Расчёт сопряжения рубашки с корпусом.....	74
5.7	Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой	79
5.8	Расчёт опор аппарата.....	89
5.9	Расчёт вала для перемешивающего устройства реактора синтеза полипропилена	95
5.10	Расчёт укрепления отверстий в реакторе синтеза полипропилена.....	108
5.11	Расчёт шпоночного соединения вала с мешалкой.....	113
6	Поверочный расчёт реактора синтеза полипропилена	115
7	Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена.....	116
8	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	120
8.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований.....	120
8.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования. Сегментация рынка	121
8.1.2	Оценка перспективности разработки	122
8.1.3	SWOT-анализ разработки.....	124
8.2	Планирование научно-исследовательских работ	127
8.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	127
8.2.2	Определение трудоёмкости выполнения работ	129
8.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	130
8.3	Бюджет научно-технического исследования	132
8.3.1	Расчёт материальных затрат НТИ	132
8.3.2	Основная заработная плата исполнителей темы.....	133
8.3.3	Дополнительная заработная плата исполнителей темы	135
8.3.4	Отчисления во внебюджетные фонды	135
8.4	Оценка научно-технического эффекта разработки	136
9	Социальная ответственность.....	138
9.1	Производственная безопасность	138
9.2	Экологическая безопасность	142
9.2.1	Защита селитебной зоны	142
9.2.2	Защита атмосферы	142
9.2.3	Защита гидросферы.....	143
9.2.4	Защита литосферы.....	143
9.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	143
9.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	145
9.4.1	Специальные нормы трудового законодательства	145

9.4.2 Компоновка оборудования	146
Заключение.....	148
Список публикаций студента	149
Список использованных источников.....	153
Приложение А Расчётная модель реактора для синтеза полипропилена для осуществления механического расчёта аппарата.....	161
Приложение Б График выполнения ВКР	163

Введение

Современная химическая промышленность немыслима без таких аппаратов, как реакторы. Вне всякого сомнения, со времени зарождения химической технологии как науки и понимание процессов, и масштабы промышленного производства шагнули далеко вперёд, однако ни один из аппаратов не представляет такой важности и ценности как тот, в котором протекают химические превращения сырья в продукт – цель всякого предприятия в данной отрасли промышленности.

В литературных источниках можно встретиться с большим количеством классификаций химических реакторов. Признаками для разделения могут быть гомо- или гетерогенность реакции, различие в температурном режиме или в давлении (работа при атмосферном, избыточном давлении, разрежении), способ организации процесса (непрерывный, периодический, полунепрерывный) и многие другие.

Наиболее распространённым видом химических реакторов, применяемых в промышленности на сегодняшний день, являются аппараты с перемешивающими устройствами. Это объясняется тем, что перемешивание реакционной массы зачастую способствует интенсификации процесса, а во многих случаях это необходимое условие для более полного его протекания, в особенности для процессов в гетерогенных системах.

Спрос на аппараты подобного рода порождает спрос и на деятельность по их проектированию, которая далеко не всегда проста и полностью подконтрольна опыту прошлых лет или нормативной документации. К каждому из химических процессов, для которого проектируется реактор, необходим особый подход, предполагающий всесторонний и детальный анализ. Для правильного претворения проекта в жизнь необходимо учитывать такие факторы, как термо- и гидродинамический режимы процесса, подходящие ему конструктивные решения, разработанные в соответствии с принципами энерго- и ресурсоэффективности, наконец, методы контроля процесса и его автоматического регулирования, без которого не обходится ни одно производство.

Таким образом, в рамках данной бакалаврской работы было решено продемонстрировать, каким образом можно упростить процесс проектирования химического реактора с перемешивающим устройством при помощи автоматизации расчётно-конструкторской разработки. В качестве исходной отрасли, для которой осуществлялось бы данное проектирование, было выбрано производство полипропилена – как одного из наиболее ходовых материалов, в котором страна нуждается и силами различных компаний год от года наращивает мощности по производству данного полимера.

Основными задачами на период реализации проекта стали: детальный анализ современного состояния производства полипропилена, разбор физико-химических закономерностей процесса, выбор подходящего аппаратного оформления и технологической схемы, расчёт основного аппарата (химического реактора с перемешивающим устройством) и, наконец, оценка экологической и экономической эффективности научной разработки. В качестве основных средств и методов работы над проблемой были выбраны анализ литературных источников для изучения теоретического материала и автоматизированное проектирование на базе программы MathCAD для осуществления расчётно-конструкторской разработки.

Результатом научно-исследовательской разработки является проект реактора для получения полипропилена, оформленный в виде расчётно-пояснительной записки с приложениями в виде технологической схемы процесса и чертежей.

1 Обзор литературы

В рамках данного раздела бакалаврской работы дан обзор возникновения и развития промышленности по производству полипропилена, рассмотрено современное состояние этой отрасли и те технологии, которые уже используются в ней.

Полипропилен – синтетический термопластичный неполярный полимер, принадлежащий к классу полиолефинов. Представляет собой бесцветное кристаллическое вещество, выпускается, чаще всего, в форме небольших полупрозрачных гранул, но также может производиться в форме листов или нитей. Полипропилен легко окрашивается в необходимые цвета путём добавления в него различного рода пигментов и красок.

Существует несколько форм полипропилена, различающихся пространственным строением молекулы полимера [1], в общем виде пространственные формулы можно представить рисунком 1.

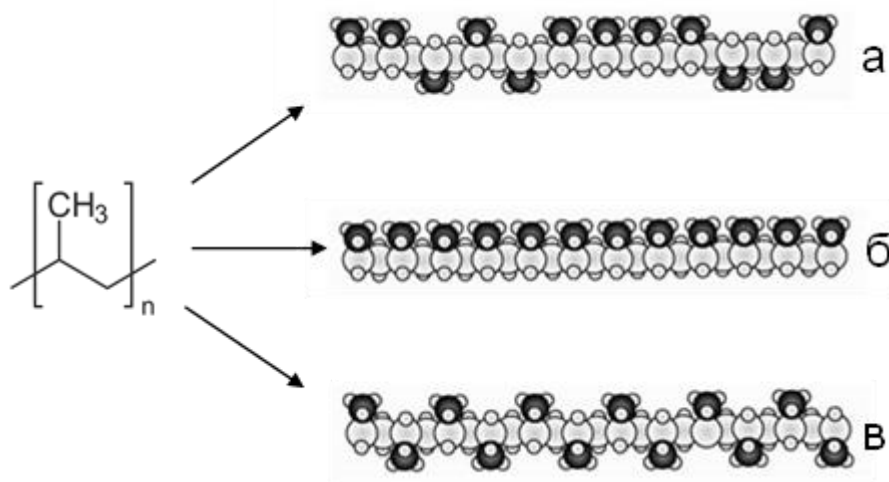


Рисунок 1 – Пространственные формы полипропилена

где а – атактический полипропилен, б – изотактический полипропилен, в – синдитактический полипропилен.

Наиболее коммерчески выгодными товарными свойствами обладает изотактический полипропилен (гомополимер). Он же и является целевым продуктом производства. В то же время атактическая форма полимера считается продуктом побочным, а многими

					ФЮРА.061526.001 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Студент	Полонский М.С.				Обзор литературы		Лит.	Лист
Руковод.	Беляев В.М.						Д	16
Конс.								6
Н. Контр.								
Руков. ООП	Краснокутская Е.А.							

предприятиями классифицируется как отходы и утилизируется. Вследствие этого одной из задач при организации ресурсо- и энергоэффективного производства полипропилена является снижение доли атактики в конечном продукте.

Рассмотрим, каким из имеющихся на вооружении у промышленности способов этого можно достигнуть.

1.1 Исходное сырьё для производства полипропилена

Исходным сырьем для производства полипропилена является пропилен, представляющий собой бесцветный горючий газ с температурой кипения $-47,6^{\circ}\text{C}$, обладающий высокой реакционной способностью [2].

Различают следующие способы получения пропилена:

- лабораторные: дегидрогалогенирование спиртовым раствором щёлочи, гидрирование пропина на палладиевом катализаторе, дегидратация изопропилового спирта в кислой среде, дегалогенирование галогеналканов под действием цинка [3];
- промышленные: выделение при нефтепереработке из смесей газов, содержащих олефины; пиролиз этана, пропана или высших алканов, содержащихся в газах нефтепереработки или природном газе [4].

1.2 Способы получения полипропилена

В настоящее время наиболее распространены три способа синтеза полипропилена:

- газофазная полимеризация;
- полимеризация в среде лёгких растворителей;
- полимеризация в среде тяжёлых растворителей.

Полимеризация пропилена в газовой фазе осуществляется в реакторе с кипящим слоем, оборудованном двуспиральной мешалкой, обеспечивающей подъём твёрдых частиц вдоль стенки и падение вдоль оси реактора. Рабочими условиями для процесса являются диапазон температур от 160 до 250°C и давление 7 МПа [5]. Основными недостатками данного процесса являются сложности с дозированием катализатора и отводом тепла. По этой причине метод газофазной полимеризации практически не применяется непосредственно для получения полиолефинов, но является составной частью процесса по производству блоксополимеров.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Полимеризация в среде лёгких растворителей осуществляется в химическом реакторе, оборудованном перемешивающим устройством и рубашкой. В качестве катализатора процесса используется катализаторный комплекс Циглера-Натта. В рубашку подаётся горячая вода, благодаря которой температура реакционной массы поддерживается в диапазоне от 60 до 80°C [6]. Отвод тепла производится посредством испарения пропан-пропиленовой фракции с её последующей конденсацией в холодильнике. Основными преимуществами данного способа ведения процесса являются эффективный и просто организованный отвод тепла и однородность получаемого продукта. Однако имеется и существенный недостаток, а именно – ограниченность числа марок полипропилена, которые можно произвести подобным способом.

В настоящее время наиболее распространённым способом получения полипропилена остаётся синтез в тяжёлом растворителе. При данном способе организации процесса получается наибольшее количество марок полипропилена. Основным аппаратом для данного процесса также является реактор, оборудованный механическим перемешивающим устройством, а также устройствами для отвода тепла. В качестве перемешивающих устройств используют турбинные мешалки, охлаждающими теплообменниками в данном процессе выступают рубашки либо, если это необходимо, погружные змеевики. Основными достоинствами данного способа синтеза являются высокая эффективность массообмена, термическая однородность среды, полнота диспергирования катализатора с мономером, однородность получаемого продукта. В качестве катализаторов также используются комплексы Циглера-Натта, обладающие таким достоинством, как широкое варьирование их состава, а потому – каталитической активности и стереоспецифичности их действия [7]. Таким образом получается продукт с малым содержанием более низкого по качеству атактического полипропилена. Основные недостатки – возможность образования агломератов, необходимость очистки продукта от растворителя и катализатора перед грануляцией.

1.3 Масштабы производства и обзор рынка полипропилена

Основные мощности по производству полипропилена сосредоточены в Северо-Восточной Азии, Западной Европе, Северной Америке. Совокупно на долю этих трех регионов приходится более 75% мирового производства, и потребления указанного полимера [8]. В мире полипропилен производят около 400 компаний, среди которых крупнейшими производителями являются голландская фирма LyondellBasell, китайская Sinopec Group,

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

саудовская SABIC Group. В таблице 1 [9] приведены данные по мировому производству и потреблению полипропилена.

Таблица 1 – Динамика изменения мировых валовых мощностей и потребления полипропилена [9]

	Год				Среднегодовой прирост, %	
	1990	2008	2012	2015	1990-2008 гг.	2009-2015 гг.
Мощность, млн т/год	14,3	52,3	65	75	7,5	5,3
Потребление, млн т/год	12,5	50,3	58	67	8	4,1

Стоит отметить, что за последние десятилетия сохраняется стабильный рост объемов производства полипропилена и растет число промышленных предприятий, специализирующихся на выпуске этого материала. На сегодня полипропилен по объему производства среди термопластов занимает второе место в мире, уступая только полиэтилену.

В России в 2016 г. выпуск полипропилена составил 1 млн 380 тыс. т. Доля в мировом рынке составляет 1,4% [10]. В последние несколько лет, присутствует тенденция к активному росту производственных мощностей, идет активное расширение объемов производства, в качестве примера можно привести реализацию двух новых проектов – «Сибур-Тобольск» (500 тыс. т) и «Полиом» (210 тыс. т) [9]. Наиболее крупными производителями в России являются группа компаний ТАИФ и Сибур; производимая ими продукция включает в себя огромный ассортимент марок, на основе различных типов полипропилена. Производственные мощности российских компаний практически полностью удовлетворяют внутренний спрос и позволяют экспортировать продукцию.

1.4 Области применения полипропилена

Промышленность пластмасс выпускает богатый ассортимент продукции, на основе полипропилена с различными свойствами в зависимости от условий переработки и назначения изделия. Структура потребления полипропилена в России по отраслям отражена на рисунке 2 [8].

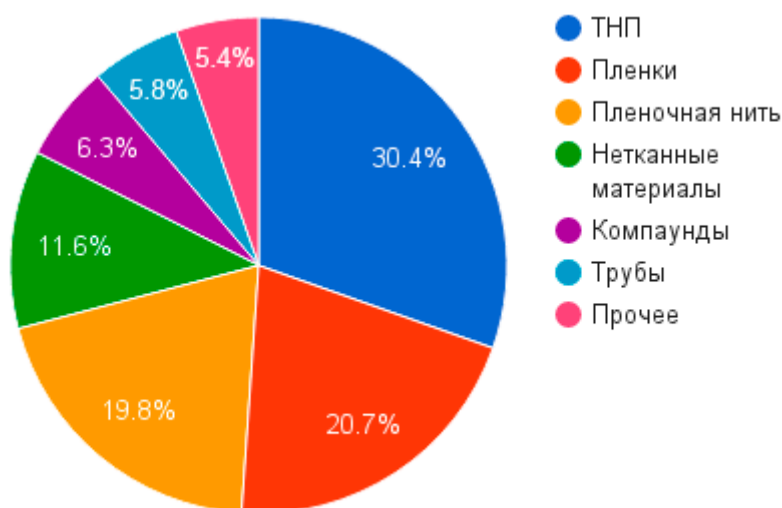


Рисунок 2 – Структура потребления ПП в России по областям применения в 2015 году [8]

Обладая ценным сочетанием свойств и, что очень важно, относительно низкой стоимостью, полипропилен исключительно быстро проник во многие отрасли промышленности. Быстрому развитию производства и применения полимера в немалой степени благоприятствовало и то, что он появился на мировом рынке в период, когда уже считалось общепризнанным, что ускорение технического прогресса и расширение производства товаров широкого потребления невозможны без применения синтетических материалов.

1.5 Выбор аппаратного оформления и технологической схемы

Исходя из приведённого в пункте 1.2 настоящей работы описания различных способов синтеза полипропилена, наиболее эффективным для реализации и наиболее простым для расчёта является способ полимеризации в тяжёлом растворителе. Подробное описание технологической схемы будет дано в следующем разделе настоящей работы. В данный момент необходимо дать перечень тех аппаратов, которые потребуются для реализации выбранной технологической схемы:

- для приготовления катализаторного комплекса необходима ёмкость, снабжённая перемешивающим устройством. Наиболее удобное с точки зрения занимаемого пространства положение ёмкости – вертикальное. Необходимый объём ёмкости и её основные геометрические параметры определяются исходя из стандарта [11]. Заранее

следует дать рекомендацию о предпочтительности торцевого уплотнения на данной ёмкости ввиду токсичности входящих в реакционную массу компонентов;

- полимеризация пропилена будет осуществляться в вертикальном реакторе непрерывного действия, также снабжённом механическим перемешивающим устройством с торцевым уплотнением и устройством для отвода тепла, возникающего в процессе реакции. Таковыми устройствами могут быть теплообменная рубашка, змеевик погружного типа или их комбинация – более точные рекомендации могут быть даны только после реализации теплового расчёта аппарата;

- для реализации процесса дегазации полипропилена и выделения катализатора из общей реакционной массы также должна использоваться вертикальная ёмкость, снабжённая турбинной мешалкой и теплообменной рубашкой;

- промывка полипропилена от продуктов разложения катализатора должна осуществляться деминерализованной водой в цилиндрической вертикальной ёмкости, снабжённой мешалкой с торцевым уплотнением;

- для отделения от целевого продукта – изотактического полипропилена – растворённой в гептане атактики следует использовать вертикальную центрифугу полунепрерывного класса соответствия с общей производительностью технологической нитки;

- сушка продукта должна осуществляться в две ступени для более полного удаления влаги: сначала на пневматической сушилке, затем – на двухкамерной в кипящем слое. Выбор сушилок осуществляется по производительности технологической нитки;

- для регенерации гептана и его очистки от атактического полипропилена целесообразно использовать роторно-плёночный испаритель для предотвращения забивки аппарата вследствие высокой вязкости осадка АПП.

Таким образом, в результате рассмотрения имеющихся данных в литературных источниках и оценки современного состояния промышленного синтеза полипропилена было вынесено решение о выборе технологической схемы производства в растворе гептана. Перечень необходимого оборудования для реализации технологической схемы дан выше. Основным аппаратом, подлежащим автоматизированному расчёту, принят химический реактор непрерывного действия с устройствами для отвода тепла.

В следующем разделе настоящей бакалаврской работы выбранная технологическая схема будет рассмотрена более подробно.

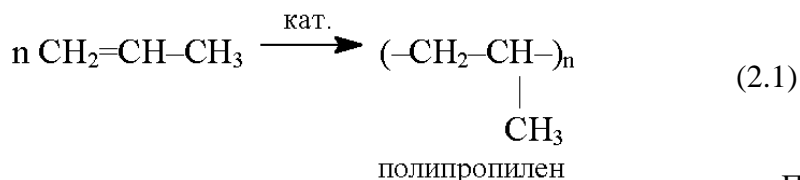
					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

2 Технологическая схема установки по производству полипропилена

В данном разделе бакалаврской работы освещается и рассматривается выбранная при обзоре литературы технологическая схема производства полипропиленпа. Для лучшего понимания принимаемых при проектировании производства решений в первую очередь необходимо рассмотреть химизм процесса полимеризации пропилена, что и было произведено в первом подпункте данного раздела.

2.1 Физико-химические закономерности синтеза полипропилена

В промышленности полипропилен получают полимеризацией пропилена в растворе или массе (блоке) мономера, большое распространение получили процессы полимеризации в газовой фазе. Полимеризация происходит в присутствии комплексной каталитической системы типа Циглера — Натта, являющиеся комплексами соединений переходных металлов (к примеру, хлориды титана, оксохлориды ванадия) с металлоорганическими соединениями металлов II и III групп. Общее уравнение полимеризации приведено ниже.



Полипропилен

выпускается в виде бесцветных или окрашенных гранул. Иногда продукт может представлять собой листы или нити в зависимости от итоговой обработки.

2.1.1 Термодинамика процесса синтеза полипропилена

Процесс полимеризации полипропилена в суспензии осуществляется в среде жидкого органического растворителя – гептана. Температурный режим протекания реакции составляет от 70 до 80°C, полимеризация проводится также под избыточным давлением,

					ФЮРА.061526.001 ПЗ							
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата								
Студент		Полонский М.С.			Технологическая схема установки по производству полипропилена				Лит.	Лист	Листов	
Руковод.		Беляев В.М.							Д		22	6
Конс.												
Н. Контр.												
Руков. ООП		Краснокутская Е.А.										

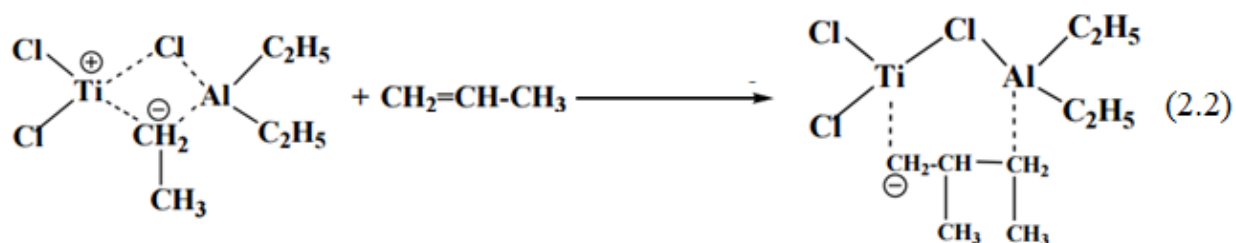
находящимся в интервале и давлении от 2,7 до 3,0 МПа [12]. Полимеризация пропилена протекает с выделением тепла. Тепловой эффект полимеризации пропилена составляет около 58,7 кДж/моль или 1385 кДж/кг [13].

2.1.2 Механизм процесса полимеризации полипропилена

Полимеризация полипропилена на комплексных металлоорганических катализаторах происходит по анионно-координационному механизму [14, 15]. Координационно-ионная полимеризация – это каталитические процессы образования макромолекул, в которых стадии разрыва связи в мономере предшествует возникновение координационного комплекса между ним и катализатором. Характер и структура комплекса зависят от типа катализатора и строения мономера. Процесс присоединения мономера к растущей макромолекуле при помощи координационных комплексов включает следующие основные стадии:

- диффузия молекулы мономера к поверхности твердого катализатора, содержащего активный центр;
- адсорбция и ориентация мономера на поверхности катализатора (образование комплекса);
- соединение мономерного звена, вошедшего в комплекс, с активным центром, сопровождающееся переходом активного центра на вновь присоединившееся звено;
- отделение от катализатора полимеризационных звеньев [15].

Координационный механизм включает в качестве одной из стадий сорбцию мономера на твердой поверхности титана в каталитическом комплексе и ориентацию молекулы мономера в результате образования π -комплекса между мономером и титаном. Далее происходит перегруппировка π - комплекса и внедрение мономера в структуру комплекса. Уравнение стадии [15]:



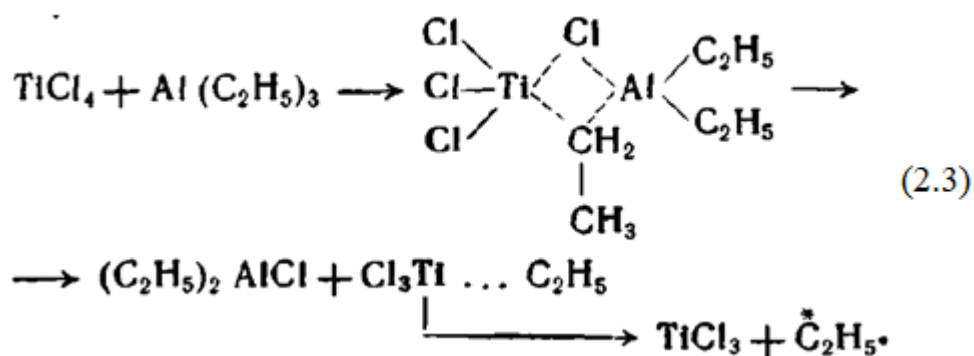
Исходная структура комплекса более устойчива термодинамически, поэтому происходит восстановление. Внедрение следующего мономерного звена (рост цепи) происходит по месту связи Ti-C, в результате чего растущая цепь полимера отодвигается от катализатора.

2.1.3 Катализаторы, применяемые при синтезе полипропилена

Полипропилен изотактической структуры синтезируется методом полимеризации в присутствии гетерогенных катализаторов. Основную роль при этом методе играют поверхность примененного гетерогенного катализатора и адсорбционные процессы, протекающие при взаимодействии поверхности катализатора с компонентами системы, растворенными в гомогенной фазе.

В качестве катализаторов полимеризации наибольшее распространение получили комплексные соединения, которые образуются при взаимодействии органических соединений металлов I–III групп Периодической системы с солями переходных металлов IV–VIII групп. Такие катализаторы называются катализаторами Циглера-Натта (открыты в 1954 г. и названы по имени их открывателей). Из катализаторов Циглера-Натта в производстве используют комплексы алюминийалкилов или алкилгалогенидов в сочетании с галогенидами титана. Достоинствами катализаторов является возможность широкого варьирования их состава и, следовательно, каталитической активности.

Наибольшее промышленное применение при полимеризации полипропилена получил комплекс, образующийся при взаимодействии TiCl_4 с $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$. При таком взаимодействии протекает ряд химических реакций, в результате которых происходит алкилирование соединения переходного металла и его восстановление до TiCl_3 . Оба компонента каталитической системы — четыреххлористый титан и триэтилалюминий — жидкости, растворимые в углеводородной среде. Их взаимодействие при смешении протекает по следующей схеме [15]:



Тип и структура катализатора влияют на степень изотактичности продукта.

2.1.4 Кинетика процесса синтеза полипропилена

Скорость полимеризации полипропилена прямо пропорциональна концентрации мономера, количеству TiCl_3 , его поверхности и почти не зависит от концентрации сокатализатора (алюминийорганические соединения):

$$\frac{dN}{dt} = kqS \frac{N_0 - N}{V} \quad (2.4)$$

где k – наблюдаемая константа скорости полимеризации пропилена; q – количество TiCl_3 , г; S – удельная поверхность TiCl_3 , $\text{м}^2/\text{г}$; N_0 – исходное число молей пропилена, моль; N – число молей пропилена, вступивших в реакцию, моль; V – объём жидкой фазы, м^3 ; t – время, с [16].

Интегральная формула определения скорости полимеризации (роста цепи) имеет вид:

$$W_p = k_p [M]^* [C]_0 \quad (2.5)$$

где k_p – константа скорости роста цепи; $[M]$ – концентрация мономера в объеме; $[C]_0$ – концентрация активных центров на поверхности катализатора [16].

2.2 Описание технологической схемы производства полипропилена

Технологическая схема производства полипропилена отражена на рисунке 3.

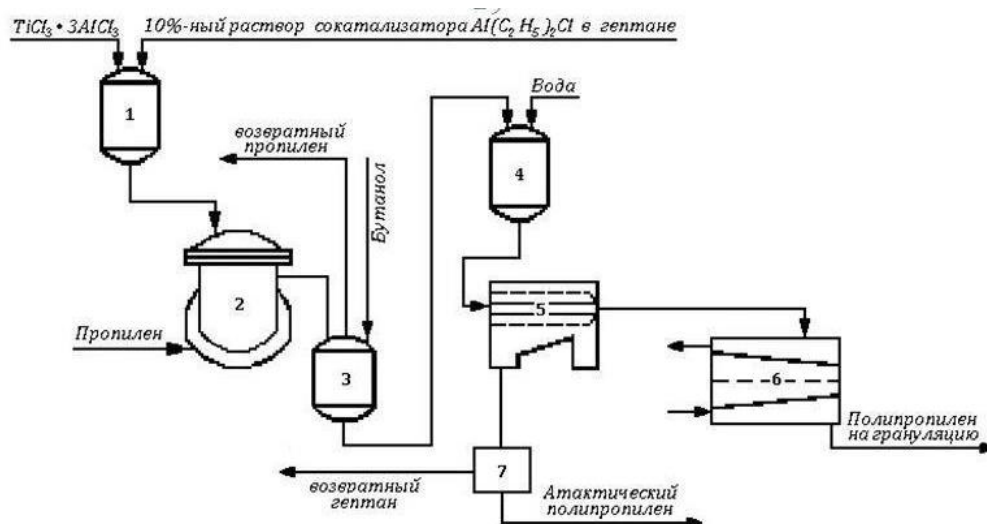


Рисунок 3 – Технологическая схема установки производства полипропилена

где 1 – комплексообразователь; 2 – реактор для полимеризации; 3 – дегазатор; 4 – ёмкость для промывки продукта; 5 – центрифуга; 6 – сушилка; 7 – испаритель.

Функционирование данной технологической схемы осуществляется следующим образом:

- в ёмкости 1 готовится катализатор Циглера-Натта. Режим работы аппарата описывается следующими параметрами: рабочее давление – не более 0,07 МПа, температура каталитической суспензии – не более 30°C, уровень заполнения ёмкости – не более 80% [12];
- в реакторе 2, осуществляется процесс полимеризации подводимого в него полипропилена. Процесс осуществляется в растворе гептана в присутствии суспензии катализаторного комплекса. Режим работы: рабочее давление – 0,7 МПа, температура суспензии – 70°C, уровень заполнения реактора – 75% [12];
- из реактора 2 суспензия полипропилена поступает в дегазатор 3, где осуществляется её промывка азеотропом. Режим работы: рабочее давление – не более 0,04 МПа, температура в аппарате – от 60 до 87°C, уровень суспензии в дегазаторе – от 40 до 80% [12];
- из дегазатора 3 полипропилен поступает в промывную ёмкость 4, где очищается водой от продуктов разложения катализатора. Режим работы аппарата: рабочее давление – не более 0,03 МПа, температура – от 50 до 70°C, уровень заполнения аппарата – от 40 до 75% [12];
- для очистки от раствора атактического полипропилена в гептане суспензия поступает из промывателя 4 на центрифугу 5;
- влажный изотактический полимер поступает сначала на первую (пневматическую), а затем на вторую (в кипящем слое) ступень осушки 6. Сушка осуществляется горячим азотом; температура газа на входе в сушилку – от 105 до 135°C [12]. Из сушилки полимер отправляется на грануляцию;
- растворённый в гептане атактический полипропилен поступает в роторно-плёночный испаритель, где из него выпаривается гептан. АПП в зависимости от способа организации производства отправляется либо на установку модификации, либо на утилизацию. Регенерированный гептан возвращается в технологическую нитку. Температурный режим: от 100 до 105°C [12].

2.3 Рекомендации по автоматизации процесса полимеризации

В соответствии с предложенной в работе технологической схемой даны следующие рекомендации по контролю и автоматизации производства:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

- для ёмкости 1 необходимо предусмотреть датчики контроля и автоматического регулирования давления, температуры и уровня заполнения аппарата. Посредством датчика уровня должна осуществляться регуляция расходов составных частей катализаторного комплекса. Также данный датчик должен быть оборудован системой сигнализации по нижнему и блокировки потоков реагентов по верхнему пределу. На ЦПУ должна быть предусмотрена световая сигнализация работы мешалки;

- для реактора 2, дегазатора 3 и промывной ёмкости 4 должны быть предусмотрены датчики контроля и автоматического регулирования давления, температуры и уровня заполнения аппарата. Посредством датчика уровня, снабжённого сигнализацией по нижнему и блокировкой по верхнему пределу, должна осуществляться регуляция расхода поступающих в аппараты веществ. Автоматическая регуляция температуры должна осуществляться соответствующим датчиком через клапан расхода теплоносителя на входе в рубашку. На ЦПУ должна быть предусмотрена световая сигнализация работы мешалки;

- для реализации центрифугирования на позиции 5 аппарат должен быть снабжён датчиком загрузки с возможностью регуляции расхода суспензии полипропилена. Аппарат необходимо подключить к командному прибору с заданным временем протекания процесса для регуляции центрифугирования;

- для реализации процесса сушки необходим датчик контроля температуры в сушильном аппарате 6, связанный с клапаном на потоке влажного материала. Схожим датчиком необходимо регулировать подачу азота в зависимости от его температуры. Необходимое давление в сушилке 6 поддерживается датчиком давления с возможностью регуляции через отвод осушённого продукта;

- испаритель 7 должен быть оборудован приборами автоматического регулирования уровня и давления. Датчик уровня должен быть снабжён сигнализацией по нижнему пределу, а также связан в систему с клапаном, установленном на потоке греющего пара в аппарат. Автоматическая регуляция давления в аппарате осуществляется посредством сброса паров регенерированного гептана через верхний клапан.

Все приведённые выше рекомендации по организации автоматизации процесса даны в соответствии с пособиями [17, 18].

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

3 Технологические расчёты реактора для синтеза полипропилена

В данном разделе приведён технологический расчёт основного аппарата схемы, а именно – реактора для синтеза полипропилена. Технологический расчёт состоит из следующих частей:

- материальный баланс реактора;
- гидродинамический расчёт реактора;
- тепловой расчёт реактора;
- конструктивный расчёт реактора.

В соответствии с этим целями технологического расчёта являются:

- для материального баланса – определение основных материальных потоков и объёма реактора, выбор соответствующего внутреннего диаметра;
- для гидродинамического расчёта – определение параметров гидродинамического режима аппарата в соответствии с процессом, выбор перемешивающего устройства, стойки, типа привода и мотор-редуктора;
- для теплового расчёта – определение основных тепловых потоков и требуемой поверхности теплообмена, выбор соответствующего теплообменного устройства;
- для конструктивного расчёта – выбор диаметров основных технологических штуцеров для ввода и отвода веществ.

3.1 Материальный баланс реактора синтеза полипропилена

Произведём расчёт материального баланса реактора.

3.1.1 Производительность аппарата по целевому продукту в час без учёта потерь:

$$P_{\text{БС}} = \frac{N}{D} \quad (3.1)$$

где N – годовая производительность, т/год; D – число дней согласно графику планово-предупредительных ремонтов.

В соответствии с техническим заданием имеем:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Студент		Полонский М.С.			Технологические расчёты реактора для синтеза полипропилена		Лит.	Лист	Листов	
Руковод.		Беляев В.М.					Д		28	17
Конс.										
Н. Контр.										
Руков. ООП		Краснокутская Е.А.								

$$П_{БС} = \frac{6200 \cdot 1000}{333 \cdot 24} = 775.8 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

3.1.2 Потери продукта в процессе работы примем равными 1,3%. Тогда производительность с учётом потерь составит:

$$П_{ПС} = \frac{П_{БС}}{1 - \frac{a}{100}} = \frac{775.8}{1 - \frac{1.3}{100}} = 786 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \quad (3.2)$$

где а – процент потерь, %.

На основании полученной производительности $П_{ПС}$ и рецептуры, предложенной в пособии [12] был составлен материальный баланс для реактора полимеризации, отраженный в таблице 2.

Таблица 2 – Материальный баланс стадии полимеризации

Приход на операцию			Расход на операцию		
Состав	Массовая доля, %	Расход, кг/ч	Состав	Массовая доля, %	Расход, кг/ч
1.Пропилен в реактор в т.ч.	50,29	988,29	1.Суспензия полипропилена в т.ч.	99,90	1963,02
- пропан		1,98	Полипропилен изотактич.	40,00	785,99
- этан		0,30	Полипропилен атактич.	2,25	44,17
2. Гептан	47,91	941,42	Олигомеры	0,04	0,79
3. Катализаторный комплекс в реактор, в том числе		33,40	Пропилен, в т.ч.	8,01	157,24
			- пропан		1,98
			- этан		0,30
Гептан	1,59	31,24	Треххлористый титан	0,01	0,20
ДЭАХ	0,09	1,77	Гептан	49,50	971,69
Треххлористый титан	0,01	0,20	ДЭАХ	0,09	1,77
Полипропилен	0,01	0,20			
4. Водород	0,01	0,20	3. Водород	0,01	0,20
5. Азот	0,09	1,77	2. Азот	0,09	1,77
Всего :	100,00	1964,98	Всего :	100,00	1964,98

3.1.3 Объем реактора в соответствии с производительностью аппарата в час и временем пребывания реагентов в реакторе [19]:

$$V_p = u \cdot \tau \quad (3.3)$$

где u – объемная скорость, м³/ч; τ – время пребывания смеси в реакторе, ч.

3.1.4 Объемная скорость [19]:

$$u = \frac{G}{\rho_{см} \cdot \varphi} \quad (3.4)$$

где G – расход по загрузке, кг/ч; $\rho_{см}$ – плотность смеси, кг/м³; φ – коэффициент заполнения аппарата.

3.1.5 Плотность смеси определяется по правилу аддитивности [19]:

$$\rho_{см} = \frac{1}{\left[\left(\frac{x_1}{\rho_1} \right) + \left(\frac{x_2}{\rho_2} \right) + \dots + \left(\frac{x_n}{\rho_n} \right) \right]} \quad (3.5)$$

где x_i – массовые доли компонентов в смеси; ρ_i – плотность компонента смеси, кг/м³.

Массовые доли компонентов принимаем согласно материальному балансу процесса.

Плотности веществ принимаем согласно справочнику [20] при температуре 25 °С:

Пропилен	$x_1 = 49.7\%$	$\rho_1 = 513$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Гептан	$x_2 = 48.5\%$	$\rho_2 = 649$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Тогда плотность смеси:

$$\rho_{см} = \frac{1}{\left(\frac{49.7\%}{513} + \frac{48.5\%}{649} \right)} = 582.712 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

3.1.6 Расход по загрузке аппарата принимаем согласно материальному балансу $G = 1965$ кг/ч, коэффициент заполнения аппарата принимаем равным $\varphi = 0,85$. Время пребывания смеси в реакторе согласно [12], составляет $\tau = 2,7$ ч. Тогда объем реактора:

$$V_p = \frac{1965 \cdot 2.7}{(582.712 \cdot 0.85)} = 10.712 \text{ м}^3$$

Согласно пособию [19] рабочий объем реактора принимается на 15 – 20% больше чем расчетный. Из технических соображений выбираем конструкцию аппарата с эллиптической крышкой и днищем. Принимаем ближайший стандартный объем реактора согласно [21] равным 12,5 м³. Общая конструкция аппарата отражена на рисунке 4 [21].

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

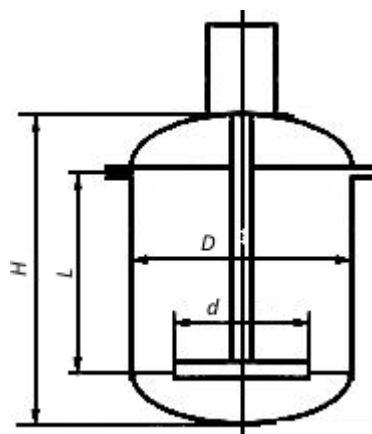


Рисунок 4 – Аппарат с мешалкой и эллиптическими крышкой и дном [21]

где D – внутренний диаметр аппарата, мм; H – общая высота аппарата, мм; L – длина обечайки, мм.

В соответствии с данным стандартом принимаем D , H и L равными соответственно 1800, 5180 и 4200 мм.

3.2 Гидродинамический расчет аппарата с внутренними устройствами

Целью гидродинамического расчета является определение усредненных характеристик поля скоростей в объеме аппарата, значений осевой и радиальной сил, действующих на мешалку, глубины воронки и мощности перемешивания.

Расчет производим согласно рекомендациям пособия [19].

Согласно пособию [19], при перемешивании в аппарате суспензий при помощи быстроходных мешалок рекомендуется включить в конструкцию аппарата отражательные перегородки, конструкция которых указана на рисунке ниже. Перегородки выполняются в виде пластин шириной $0.1 \cdot D$ и устанавливаются для избегания образования слишком глубокой воронки при перемешивании. Внешний вид перегородок представлен на рисунке 5 [22].

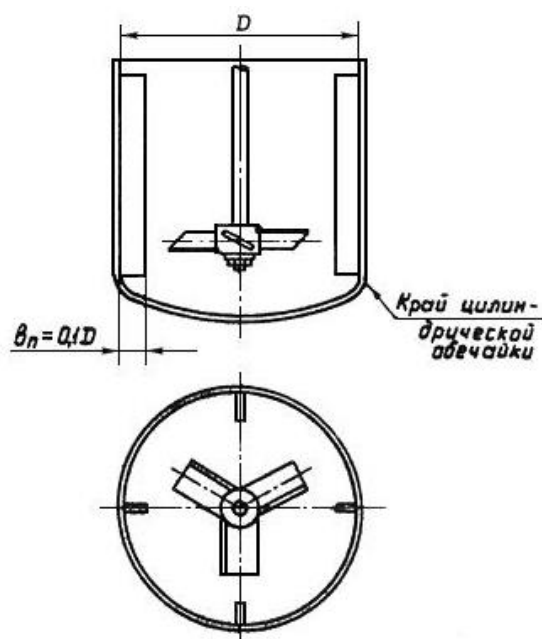


Рисунок 5 – Схема установки отражательных перегородок [22]

Параметры перегородок [22]:

- число перегородок $Z_{оп} = 3$
- высота перегородок $h_{оп} = 1.8 \text{ м}$
- ширина перегородок $b_{п} := 0.1 \cdot D = 0.1 \cdot 1.8 = 0.18 \text{ м}$

3.2.1 Отношение диаметра аппарата к диаметру мешалки [19]:

$$\Gamma_D = \frac{D}{d_m} \quad (3.6)$$

где d_m – диаметр мешалки, мм.

Согласно рекомендациям документа [22], а также поскольку для реактора получения полипропилена необходима быстроходная мешалка, выбираем трехлопастную мешалку. Её внешний вид представлен на рисунке 6 [23].

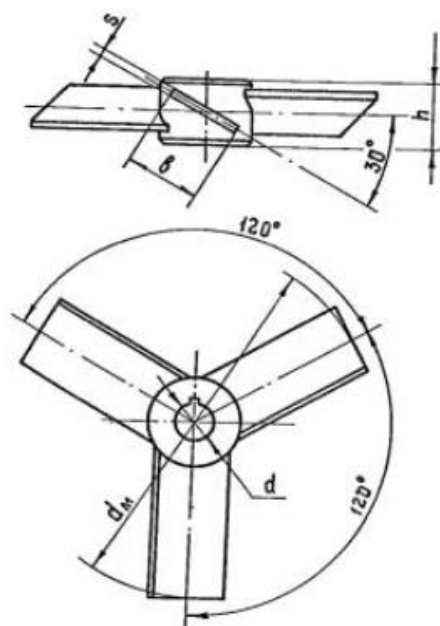


Рисунок 6 – Конструкция трёхлопастной мешалки [23]

Основные параметры мешалки [23]:

$$d_M = 0.56 \text{ м} \quad h = 0.7 \text{ м} \quad b = 0.112 \text{ м} \quad S = 0.006 \text{ м}$$

где h – ширина ступицы, м; b – ширина лопасти, м; S – толщина лопасти, м.

Тогда:

$$\Gamma_D = \frac{D}{d_M} = 3.214$$

3.2.2 Центробежный критерий Рейнольдса [19]:

$$Re_{\text{ц}} = \frac{n \cdot d_M^2}{\nu} \quad (3.7)$$

где n – частота вращения мешалки, 1/с; ν – кинематическая вязкость перемешиваемой среды, м²/с; d_M – диаметр мешалки, мм.

Поскольку мешалка быстроходная, примем её частоту вращения n равной 180 об/мин или 3 с⁻¹.

3.2.3 Кинематическая вязкость вычисляется по формуле [19]:

$$\nu = \left(\frac{\mu}{\rho_{\text{сус}}} \right) \quad (3.8)$$

где μ – динамическая вязкость суспензии, Па*с; $\rho_{\text{сус}}$ – плотность суспензии, кг/м³.

3.2.4 Динамическая вязкость, мПа*с [19]:

$$\mu := \mu_{\text{ж}} \cdot \left[1 + \frac{2.5}{2 \cdot (1 - 1.35 \cdot \varphi_{\text{T}})} \right] = 0.25 \cdot \left[1 + \frac{2.5}{2 \cdot (1 - 1.35 \cdot 0.35)} \right] = 0.842 \text{ мПа} \cdot \text{с} \quad (3.9)$$

где $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость гептана при 70°C, равная 0,25 мПа*с [20]; φ_{T} – объёмная доля твёрдой фазы в суспензии, равная 0,35 [12].

3.2.5 Плотность суспензии:

$$\rho_{\text{сус}} = \frac{1}{\frac{x_{1.}}{\rho_{1.}} + \frac{x_{2.}}{\rho_{2.}}} \quad (3.10)$$

где, в соответствии со справочниками [12, 20]:

$x_{1.} = 0.43$ - массовая доля полипропилена;

$x_{2.} = 0.57$ - массовая доля гептана;

$\rho_{1.} = 946$ - плотность полипропилена, кг/м³;

$\rho_{2.} = 684$ - плотность гептана, кг/м³.

Тогда:

$$\rho_{\text{сус}} = \frac{1}{\frac{0.43}{946} + \frac{0.57}{684}} = 776.47 \text{ кг/м}^3$$

3.2.6 Кинематическая вязкость, м²/с:

$$\nu = \frac{8.424 \times 10^{-4}}{776.47} = 1.085 \times 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

3.2.7 Критерий Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ц}} = \frac{3 \cdot 0.56^2}{1.085 \cdot 10^{-6}} = 8.671 \times 10^5$$

3.2.8 Параметры высоты заполнения аппарата [19]:

$$\gamma = 1 \cdot \frac{H}{D} + p \quad (3.11)$$

где H - высота заполнения аппарата средой, м;

$l = 4$ - для аппаратов с отражающими перегородками;

$p = 1$ - для аппаратов со свободной поверхностью жидкости;

С учетом стандартного объема аппарата и степени его заполнения при расчетном объеме имеем:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

$$\gamma = 4 \cdot \frac{3.773}{1.8} + 1 = 9.385$$

3.2.9 Осредненное значение скорости потока [19]:

$$V_{cp} = 4.35 \cdot n \cdot d_M \cdot \left(\frac{z_M \cdot \zeta_M}{\Gamma_D^2 \cdot \gamma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.12)$$

где ζ_M – коэффициент сопротивления трёхлопастной мешалки, равный 0,56 [19]; z_M – число мешалок на валу (конструктивно принимаем равным двум).

Отсюда:

$$V_{cp} = 4.35 \cdot 3 \cdot 0.56 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0.56}{3.214^2 \cdot 9.385} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.652 \quad \frac{м}{с}$$

3.2.10 Параметр сопротивления перегородок [19]:

$$\theta := \frac{2 \cdot \Gamma_D \cdot Z_{оп} \cdot h_{оп}}{\zeta_M \cdot D \cdot z_M} \cdot \ln \left(\frac{D}{D - 2b_{п}} \right) = \frac{2 \cdot 3.214 \cdot 3 \cdot 1.8}{0.56 \cdot 1.8 \cdot 2} \cdot \ln \left(\frac{1.8}{1.8 - 2 \cdot 0.18} \right) = 3.842 \quad (3.13)$$

где $z_{оп}$ – число отражающих перегородок [22]; $h_{оп}$ – высота отражающей перегородки, мм [22]; $b_{оп}$ – ширина отражающей перегородки, мм; [22].

3.2.11 Коэффициент мощности K_1 по [22] принимаем равным 0,17. Коэффициент мощности K_N по [22] принимаем равным 0,52. Тогда мощность, потребляемая мешалкой при перемешивании [19]:

$$N := K_N \cdot \rho_{сус} \cdot n^3 \cdot d_M^5 = 0.52 \cdot 776.471 \cdot 3^3 \cdot 0.56^5 = 600.388 \text{ Вт} \quad (3.14)$$

3.2.12 Необходимая мощность привода с учетом пусковых нагрузок принимается на 20% больше [19], то есть:

$$N_{п} = 1.2 \cdot N = 1.2 \cdot 600.388 = 720.466 \text{ Вт}$$

По результатам расчета из ближайших нормативных значений справочника [24] выбираем привод типа I: вертикальный с концевой опорой, мотор редуктором типа ВО и электродвигателем серии АО2. Частота вращения вала $n = 180$ об/мин, угловая скорост вращения $\omega = 18,8 \text{ с}^{-1}$. Номинальная мощность $N_{ном} = 1.5 \text{ кВт}$.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

3.3 Тепловой баланс реактора для синтеза пропилена

Целью теплового расчета аппарата является определение теплового потока Q_T через теплообменные устройства аппарата и последующее определение площади поверхности теплообмена F .

Тепловой расчет производится в соответствии с рекомендациями пособия [19].

3.3.1 Уравнение теплового баланса [19]:

$$\Sigma Q_{\text{пр}} = \Sigma Q_{\text{расх}} + Q_{\text{пот}} \quad (3.15)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – физическое тепло, вносимое в аппарат с материальными потоками (теплота реакции, фазовых переходов и т.д.); $Q_{\text{расх}}$ – физическое тепло, уносимое из аппарата продуктами реакции; $Q_{\text{пот}}$ – тепло теряемое в окружающую среду.

Согласно условиям процесса полимеризации, выделяющуюся теплоту в процессе реакции необходимо отводить и поддерживать температуру реакционной смеси равной 70°C . Температуру воды, поступающую в рубашку, примем равной 25°C , а температуру выходящей из рубашки воды равной 67°C [12].

3.3.2 Требуемый тепловой поток [19]:

$$Q_i = K_i \cdot F_i \cdot \Delta T_{\text{ср},i} \quad (3.16)$$

где K_i – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$; F_i – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; $\Delta T_{\text{ср},i}$ – средняя разность температур между перемешиваемой средой и теплоносителем, K .

3.3.3 Условие определения требуемого теплового потока [19]:

$$\Sigma Q_i \geq Q_T, \quad (3.17)$$

$$Q_T = Q_p + N + Q_M - Q_{\text{п}} \quad (3.18)$$

где Q_p – тепловой поток реакции, Вт ; Q_M – тепло, вводимое в аппарат с материальными потоками, Вт ; N – мощность, вводимая в аппарат перемешивающим устройством, Вт ; $Q_{\text{п}}$ – потери тепла в окружающую среду, Вт .

3.3.4 Тепло вводимое в аппарат с материальным потоком, Вт [17]:

$$Q_M = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5 - Q_6 \quad (3.19)$$

где Q_1 – количество тепла, приходящее с пропиленом, Вт ; Q_2 – количество тепла приходящее с гептаном, Вт ; Q_3 – количество тепла приходящее с катализаторным раствором, Вт ; Q_4 – количество тепла приходящее с газами, Вт ; Q_5 – количество тепла уносимое суспензией полипропилена, Вт ; Q_6 – количество тепла уносимое газами, Вт .

3.3.5 Расчет количества тепла i -го потока [19]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$Q_i = \frac{G_i \cdot C_{p,i} \cdot T_i}{3.6} \quad (3.20)$$

где G_i – массовый расход i -го потока, кг/ч; $C_{p,i}$ – теплоемкость i -той смеси, кДж/(кг·К); T_i – температура потока, К.

3.3.6 Теплоемкости веществ определяем при помощи справочника [20]. В случае если поток состоит из нескольких веществ, теплоемкость определяется по правилу аддитивности, по следующей формуле:

$$C_{p,i} = x_1 \cdot C_{p,1} + x_2 \cdot C_{p,2} + \dots + x_n \cdot C_{p,n} \quad (3.21)$$

где $x_{1,2,n}$ – массовая доля вещества в смеси; $C_{p,1,2,n}$ – теплоемкость вещества при температуре процесса, кДж/(кг·К).

Произведем расчет тепловых потоков, согласно их массовым расходам в материальном балансе:

- приход тепла с потоком пропилена:

$$Q_1 := \frac{G_1 \cdot C_{p1} \cdot T_1}{3.6} = \frac{988.29 \cdot 1.62 \cdot (70 + 273)}{3.6} = 1.525 \times 10^5 \text{ Вт}$$

- приход тепла с потоком гептана:

$$Q_2 := \frac{G_2 \cdot C_{p2} \cdot T_2}{3.6} = \frac{941.42 \cdot 2.52 \cdot 343}{3.6} = 2.26 \times 10^5 \text{ Вт}$$

- приход тепла с потоком катализатора:

$$C_{p3} = x_{TiCl} \cdot C_{p,TiCl} + x_{ДЭАХ} \cdot C_{p,ДЭАХ} + x_{геп} \cdot C_{p,геп}$$

$$C_{p3} = 0.005 \cdot 1.3 + 0.05 \cdot 2.5 + 0.935 \cdot 2.52 = 2.49 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q_3 := \frac{G_3 \cdot C_{p3} \cdot T_3}{3.6} = \frac{33.4 \cdot 2.488 \cdot 343}{3.6} = 7.917 \times 10^3 \text{ Вт}$$

- приход тепла с потоком газов незначителен, примем его как 0,05% от всех входящих потоков тепла:

$$Q_4 := 0.0005 \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) = 5 \times 10^{-4} \cdot (1.525 \times 10^5 + 2.26 \times 10^5 + 7.917 \times 10^3) = 193.25 \text{ Вт}$$

- унос тепла с суспензией полипропилена:

$$C_{p5} := x_{геп} \cdot C_{p,геп} + x_{пп} \cdot C_{p,пп} + x_{п} \cdot C_{p1} = 0.495 \cdot 2.52 + 0.425 \cdot 2.9 + 0.08 \cdot 1.62 = 2.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$Q_5 := \frac{G_5 \cdot C_{p5} \cdot T_5}{3.6} = \frac{1.963 \times 10^3 \cdot 2.609 \cdot 343}{3.6} = 4.881 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.7 Так как газы не участвуют в реакции, то они выходят в том же объеме и при той же температуре, что и входят, соответственно можем принять теплоту, уносимую газами равной Q_4 :

$$Q_6 = Q_4 = 193.247 \text{ Вт}$$

Тогда тепло, вводимое в аппарат с материальным потоком:

$$Q_M = 1.525 \times 10^5 + 2.26 \times 10^5 + 7.917 \times 10^3 + 193.247 - 4.881 \times 10^5 - 193.247 = -1.016 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.8 Реакция полимеризации полипропилена экзотермическая. Количество выделяющегося тепла [19]:

$$Q_p = \frac{G_1 \cdot \Delta H \cdot X_a}{3.6} \quad (3.22)$$

где $\Delta H = 1386 \text{ кДж/кг}$ – изменение энтальпии реакции полимеризации [20]; $X_a = 0.84$ – степень конверсии полипропилена [12].

Тогда:

$$Q_p = \frac{988.29 \cdot 1.386 \times 10^3 \cdot 0.84}{3.6} = 3.196 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.9 Мощность привода мешалки определена в предыдущем разделе и равна $N = 1.5 \text{ кВт} = 1500 \text{ Вт}$. Количество потерь теплоты обычно принимается равным 3-5% от общего количества теплоты [19]:

$$Q_{\text{пот}} := 0.03 \cdot (Q_M + N + Q_p) = 0.03 \cdot (-1.016 \times 10^5 + 1.5 \times 10^3 + 3.196 \times 10^5) = 6.586 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Тогда значение теплового потока составит:

$$Q_T = -1.016 \times 10^5 + 1.5 \times 10^3 + 3.196 \times 10^5 - 6.586 \times 10^3 = 2.13 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.10 Коэффициент теплопередачи [19]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \Sigma \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_T}} \quad (3.23)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи от перемешиваемой среды к стенке теплообменного устройства, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; α_T – коэффициент теплоотдачи от стенки теплообменного устройства

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

охлаждающему агенту, Вт/(м²*К); $\Sigma(\delta/\lambda)$ – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений, рассчитываемая по формуле:

$$\Sigma \cdot \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) = \frac{s}{\lambda} + \frac{s'}{\lambda'} \quad (3.24)$$

где s – толщина теплопередающей стенки, принимаемая равной 0,008 м по механическому расчёту; s' – толщина образовавшегося слоя накипи, принимаемая конструктивно равной 0,002 м [25]; λ – коэффициент теплопроводности стали 12Х18Н10Т, равный 16 Вт/(м*К) [26]; λ' – коэффициент теплопроводности накипи, принимаемый равным 2 Вт/(м*К) [25].

3.3.11 Коэффициент теплоотдачи от реакционной массы к стенке аппарата при использовании быстроходных мешалок [19]:

$$\alpha_c = a_2 \cdot N^{0.29} \cdot D^{(-0.71)} + a_3 \cdot N^{0.18} \cdot D^{0.82} \quad (3.25)$$

где D – внутренний диаметр аппарата, м; N – мощность привода мешалки, Вт;

a_2 и a_3 – вспомогательные коэффициенты которые рассчитываются по следующим формулам [19]:

$$a_2 = 0.0237 \cdot a_1 \cdot \rho^{0.58} \cdot \mu^{(-0.54)} \quad (3.26)$$

$$a_3 = 0.93 \cdot a_1 \cdot \rho^{0.36} \cdot \mu^{-0.24} \quad (3.27)$$

где $\rho = 776.5$ кг/м³ – плотность реакционной среды; $\mu = 0.842$ мПа*с – динамическая вязкость среды (рассчитаны в предыдущих пунктах)

Тогда:

$$a_2 = 0.024 \cdot 0.352 \cdot 776.471^{0.58} \cdot (8.424 \times 10^{-4})^{-0.54} = 18.104$$

$$a_3 = 0.93 \cdot 0.352 \cdot 776.471^{0.36} \cdot (8.424 \times 10^{-4})^{-0.24} = 19.649$$

$$\alpha_c = 18.104 \cdot (1.5 \times 10^3)^{0.29} \cdot 1.8^{-0.71} + 19.649 \cdot (1.5 \times 10^3)^{0.18} \cdot 1.8^{0.82} = 218.124 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.12 Коэффициент теплоотдачи от стенки теплообменного устройства к жидкости, находящейся в нём [19]:

$$\alpha_T = C_s \cdot \lambda_T \cdot (GrPr)^f \cdot H_p^{-1} \quad (3.28)$$

где C_s и f – вспомогательные коэффициенты определяем по таблице из пособия [19] в зависимости от произведения $Pr \cdot Gr$; $Gr \cdot Pr$ – произведение критериев Грасгофа и Прандтля; $\lambda_T = 0.668$ Вт/(м*К) – коэффициент теплопроводности воды [20]; H_p – высота

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

цилиндрической части рубашки [21].

3.3.13 Средняя температура теплоносителя вычисляется как среднее значение между начальной и конечной температурой воды [19]:

$$T_{cp} := 0.5 \cdot (T_H + T_K) = 0.5 \cdot (298 + 340) = 319 \text{ К} \quad (3.29)$$

3.3.14 Температура стенки вычисляется как средняя между средней температурой теплоносителя и температурой среды в аппарате по аналогии с формулой (3.29):

$$T_{ст} := 0.5 \cdot (T + T_{cp}) = 0.5 \cdot (343 + 319) = 331 \text{ К}$$

3.3.15 Вспомогательный параметр Δ для воды [19]:

$$\Delta = 3.835 \cdot 10^9 + 0.4283 \cdot 10^9 \cdot T_{cp} + 1.004 \cdot 10^7 \cdot T_{cp}^2 = 1.162 \times 10^{12} \quad (3.30)$$

3.3.16 Произведение критериев Грасгофа и Прандтля [19]:

$$Gr \cdot Pr = H_p^3 \cdot (T_{ст} - T_{cp}) \cdot \Delta \quad (3.31)$$

где $H_p = 4.05 \text{ м}$ – высота цилиндрической части рубашки [21].

Отсюда:

$$Gr \cdot Pr = 4.05^3 \cdot (331 - 319) \cdot 1.162 \times 10^{12} = 9.264 \times 10^{14}$$

3.3.17 Согласно [19] принимаем значения $C_s = 0.135$ и $f = 0.33$. Тогда, коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке аппарата будет равен:

$$\alpha_T = 0.135 \cdot 0.668 \cdot (9.264 \times 10^{14})^{0.33} \cdot 4.05^{-1} = 1.935 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.18 Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{218} + \frac{1}{1.935 \cdot 10^3} + \frac{8 \times 10^{-3}}{16} + \frac{2 \times 10^{-3}}{2}} = 151.424 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.19 Средний температурный напор [19]:

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_B - \Delta T_M}{\ln(\Delta T_B / \Delta T_M)}, \quad (3.32)$$

где ΔT_B и ΔT_M – соответственно, большая и меньшая разности температур теплоносителя и перемешиваемой среды на входе и выходе.

В соответствии с уже принятыми значениями температур теплоносителей [19]:

$$\Delta T_B = (70 - 25) + 273 = 318 \text{ К}$$

$$\Delta T_M = (70 - 67) + 273 = 276 \text{ К}$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

Тогда:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{318 - 276}{\ln\left(\frac{318}{276}\right)} = 296.5 \text{ К}$$

3.3.20 Площадь поверхности теплообмена:

$$F_{\text{тв}} := \frac{Q_{\text{т}}}{K \cdot \Delta T_{\text{ср}}} = \frac{2.13 \times 10^5}{151.424 \cdot 296.5} = 21.53 \text{ м}^2$$

3.3.21 В соответствии с конструкцией аппарата по стандарту [21] примем в качестве теплообменного устройства гладкую теплообменную рубашку конструкции: внутренний диаметр $D_{\text{руб}} = 1950$ мм, толщина стенки $s_{\text{руб}} = 8$ мм (из механического расчёта); высота цилиндрической части $H_{\text{руб}} = 3770$ мм.

Поверхность теплообмена рубашки [19]:

$$F_{\text{руб}} = \pi \cdot (D_{\text{руб}} + 2 \cdot s_{\text{руб}}) \cdot H_{\text{руб}} \quad (3.33)$$

То есть:

$$F_{\text{руб}} = \frac{\pi \cdot (1950 + 2 \cdot 8) \cdot 3770}{10^6} = 23.285 \text{ м}^2$$

Таким образом, поскольку поверхность теплообмена у рубашки больше, чем расчётная, позволительно в данном проекте использовать её в качестве теплообменного устройства.

3.3.21 Расход воды в рубашку для охлаждения аппарата [19]:

$$G_{\text{в}} := \frac{(Q_{\text{т}})}{C_{\text{р.в}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{н}})} = \frac{2.13 \times 10^5}{4.18 \times 10^3 \cdot (340 - 298)} = 1.213 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (3.34)$$

где $C_{\text{р.в}}$ – теплоёмкость воды при средней температуре теплоносителя, кДж/(кг*К) [20].

3.4 Конструктивный расчёт реактора синтеза полипропилена

Расчётный диаметр технологического штуцера [27]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho}} \quad (3.35)$$

где G – массовый расход потока, кг/с; ω – скорость потока, м/с; ρ – плотность поступающего вещества, кг/м³.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

Массовые расходы веществ определены в рамках материального баланса аппарата. Скорости потоков в соответствии с рекомендациями [27] принимаются в интервале от 0,5 и до 2 м/с для жидкостей и от 10 до 30 м/с для газообразных веществ. Плотности веществ в потоках принимаются по данным справочника [20]. Размеры стандартных штуцеров примем в соответствии с документом [28].

Для удобства систематизируем данные в таблице 3.

Таблица 3 – Расчёт диаметров технологических штуцеров

Обозначение	Назначение	G, кг/с	w, м/с	ρ , кг/м ³	d, м	D _y , мм [28]	s, мм [28]	l, мм [28]
А	Ввод полипропилена в реактор	0,275	0,5	513	0,04	40	3	215
Б	Ввод гептана в реактор	0,262	0,5	649	0,03	32	3	215
В	Ввод катализаторного комплекса в реактор	0,0093	0,5	650	0,01	20	3	215
Г	Ввод воды в рубашку	1,213	0,5	1000	0,05	50	3	215
Д	Отвод воды из рубашки	1,213	0,5	1000	0,05	50	3	215
Е	Отвод суспензии полипропилена из реактора	0,546	0,5	780	0,04	40	3	215
Ж	Установка датчика давления					25	3	215
З	Установка датчика температуры					25	3	215
Л	Люк-лаз					500	12	270

где D_y – условный проход штуцера, мм; s – толщина стенки штуцера, мм; l – длина штуцера, мм. Все три величины приняты в соответствии с документом [28].

Таким образом, для реактора синтеза полипропилена были выбраны необходимые технологические штуцера. Дополнительные рекомендации по необходимости и методам укрепления отверстий для этих штуцеров будут даны в рамках механического расчёта.

3.5 Расчёт тепловой изоляции реактора синтеза полипропилена

В соответствии с пособием [27] толщину тепловой изоляции находят по равенству удельных тепловых потоков через слой изоляции от поверхности изоляции в окружающую среду:

$$\alpha_B \cdot (t_{CT2} - t_B) = \frac{\lambda_{И}}{\delta_{И}} \cdot (t_{CT1} - t_{CT2}) \quad (3.36)$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала в окружающую среду, Вт/(м²*К) [24]:

$$\alpha_B = 9.3 + 0.058 \cdot t_{CT2} \quad (3.37)$$

t_{CT2} – температура изоляции со стороны окружающей среды (воздуха), принимаемая для аппаратов, расположенных в закрытом помещении в интервале от 35 до 45°C; t_{CT1} – температура изоляции со стороны аппарата, принимаемая равной средней температуре среды в аппарате, °С; t_B – температура окружающей среды (воздуха), °С; $\lambda_{И}$ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/(м*К).

3.5.1 Выберем в качестве материала для теплоизоляции совелит (85% магнезии + 15% асбеста), имеющий коэффициент теплопроводности 0,098 Вт/(м*К). Тогда, приняв t_{CT2} равной 40, t_{CT1} – 70, а t_B – 30 °С, получим:

$$\alpha_B = 9.3 + 0.058 \cdot 40 = 11.62 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\delta_{И} = \frac{0.098 \cdot (70 - 40)}{[11.62 \cdot (40 - 30)]} = 0.025 \quad \text{м}$$

3.5.2 Таким образом, принимаем толщину совелитовой изоляции равной 25мм.

3.5 Выводы по результатам технологических расчётов

В рамках технологического расчёта были приняты следующие конструктивные решения:

- по материальному балансу – выбран реактор объёмом 12,5 м³, внутренним диаметром 1800 мм, высотой 5180 мм и длиной цилиндрической обечайки 4200 мм;
- по гидравлическому расчёту – была выбрана быстроходная трёхлопастная мешалка с диаметром 560 мм, частотой вращения 180 об/мин. Для этой мешалки был подобран вертикальный привод типа I с концевой опорой, мотор-редуктор типа ВО и электродвигатель серии АО2. Номинальная мощность привода равна 1,5 кВт;
- по тепловому расчёту – выбрана гладкая теплообменная рубашка с внутренним диаметром 1950 мм, толщиной стенки 8 мм, высотой цилиндрической части 3770 мм и поверхностью теплообмена 23,285 м²;

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- по конструктивному расчёту – выбраны стандартные технологические штуцера для всех потоков, входящих в аппарат и выходящих из него, датчиков давления и температуры, а также определён штуцер под люк-лаз.
- по расчёту тепловой изоляции – принято решение установить реактор в помещении ввиду его малых габаритов; для реактора принята совелитовая изоляция слоем толщиной 25 мм.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

4 Выбор конструкционных материалов

Основными требованиями, которым должны отвечать химические аппараты, являются механическая надежность, долговечность, конструктивное совершенство, простота изготовления, удобство транспортирования, монтажа и эксплуатации. В соответствии с источником [29] к конструкционным материалам проектируемой аппаратуры предъявляются следующие требования:

- материалы должны быть стойки по отношению к коррозии в агрессивных средах при рабочих параметрах процесса;
- им необходима высокая прочность при заданных рабочих давлениях, температуре и дополнительных нагрузках, возникающих при прочностных испытаниях и эксплуатации аппаратов;
- материалы должны легко поддаваться сварке, а их сварные соединения – иметь высокую механическую прочность;
- материалы должны быть недороги и доступны.

Кроме того, при выборе конструкционных материалов необходимо учитывать физические свойства материалов (теплопроводность, линейное расширение и т. д.).

Для проведения конструктивно-механического расчёта аппарата необходимо определить материалы следующих его частей:

- детали, подверженные коррозионному воздействию реакционной среды находящейся в аппарате (корпус, днище, фланец, крышка, соответствующие штуцеры, мешалка, вал и его уплотнение);
- детали, подверженные коррозионному воздействию охлаждающей воды (рубашка, отдельные части корпуса и днища, соответствующие штуцеры);
- крепёжные элементы, не контактирующие с реакционной средой или охлаждающей водой (болты, гайки, шайбы);
- прокладки (в частности, прокладка во фланце).

В результате анализа различных литературных источников, рекомендаций и стандартов можно прийти к следующим выводам:

- для элементов, контактирующих с реакционной массой принять в соответствии

					ФЮРА.061526.001 ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Студент		Полонский М.С.			Выбор конструкционных материалов		Лит.	Лист	Листов	
Руковод.		Беляев В.М.					Д		45	6
Конс.										
Н. Контр.										
Руков. ООП		Краснокутская Е.А.								

с рекомендациями [24, 29, 30] назначить сталь 12X18H10T в качестве конструкционного материала. Данная сталь является достаточно надёжной для работы в агрессивных средах с высокой коррозионной активностью;

- для теплообменной рубашки, контактирующей только с водой, по рекомендации [24, 29] позволительно использовать сталь 15ХМ, поскольку температурный диапазон её применимости соответствует условиям протекания технологического процесса;
- для крепёжных деталей (болтов, гаек, шайб) в соответствии с пособием [24, 29] позволительно использовать сталь 20, поскольку она рекомендована для данных изделий, а температурный диапазон её применимости также соответствует технологическому режиму. Крепёжные элементы не контактируют с коррозионными и агрессивными средами, что также является аргументом в пользу использования данной стали;
- для изготовления прокладок по рекомендации [24] предлагается использовать фторопласт-4 как материал, устойчивый в средах средней и высокой агрессивности, а также соответствующий температурному режиму протекания процесса в реакторе.

Для дальнейшего расчёта аппарата необходимо определить основные показатели его конструкционных материалов. Схема расчёта продемонстрирована на примере стали 12X18H10T, показатели по остальным материалам будут приведены в конце раздела.

4.1 Расчёт основных характеристик материала

Средами, воздействующими на стенку цилиндрической обечайки корпуса аппарата, являются охлаждающая вода и суспензия полипропилена в гептане с температурами 67 и 70°C соответственно. Расчётная температура определяется из условия [31]:

$$t_p := \max(t_n, 20) \quad (4.1)$$

где t_p – расчётная температура, °C; t_n – рабочая температура, °C [31].

В соответствии с данным условием примем значение рабочей температуры стенки цилиндрической обечайки равным 70°C, поскольку максимальная температура охлаждающей воды в рубашке близка к температуре в реакторе.

4.1.1 Допускаемое напряжение для аустенитных хромоникелевых сталей [31]:

$$\sigma_d = \eta \cdot \min \left(\frac{R_{p0.2t}}{n_T}, \frac{R_{m.t}}{n_B} \right) \quad (4.2)$$

где σ_d – допускаемое напряжение, МПа; η – поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям; $R_{p0.2t}$ – минимальное значение условного предела текучести при остаточном

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

удлинении 0,2% при расчётной температуре, МПа; $R_{m/t}$ – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при расчетной температуре, МПа; n_T – коэффициент запаса прочности по пределу текучести; n_b – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению [31].

Поправочный коэффициент η принимается равным 1, поскольку обечайка изготавливается из листового проката, а не из отливки. Коэффициенты запаса прочности по пределу текучести и временному сопротивлению n_T и n_b в соответствии с [31] принимаются равными 1,5 и 3. Предел текучести и временное сопротивление $R_{p0,2/t}$ и $R_{m/t}$ принимаются по таблицам Б.8 и Б.9 методом линейной интерполяции:

$$R_{p.02.t} = \text{Floor}\left(\text{linterp}\left(t, R_{p.02.t}, t_p\right), 0.5\right) \quad (4.3)$$

где t – температурный диапазон, °C; Floor и linterp – функции округления и линейной интерполяции.

Таким образом:

$$R_{p.02.70} = \text{Floor}\left[\text{linterp}\left[\left(\frac{20}{100}\right), \left(\frac{240}{228}\right), 70\right], 0.5\right] = 232.5 \text{ МПа}$$

$$R_{m.70} = \text{Floor}\left[\text{linterp}\left[\left(\frac{20}{100}\right), \left(\frac{540}{500}\right), 70\right], 0.5\right] = 515 \text{ МПа}$$

В расчётах мы пренебрегли множителем $R_{p.02.20}/240$, поскольку предел текучести для данной стали при 20°C также равен 240 МПа, а потому предлагаемый в стандарте [31] множитель будет равен единице.

Тогда по формуле (4.2):

$$\sigma_d = 1 \cdot \min\left(\frac{232.5}{1.5}, \frac{515}{3}\right) = 155 \text{ МПа}$$

Принимаем σ_d равным 155 МПа.

Для условий гидравлических испытаний коэффициент запаса прочности n_T принимается равным 1,1. Значение предела текучести берётся из той же таблицы Б.8 но, в соответствии со стандартом [31], при 20°C, так как именно при такой температуре проводятся испытания.

Допускаемое напряжение при гидравлическом испытании [31]:

$$\sigma_{d.20} = \eta \cdot \frac{R_{p.02.20}}{n_T} \quad (4.4)$$

Тогда:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

$$\sigma_{д.20} = 1 \cdot \left(\frac{240}{1.1} \right) = 218 \text{ МПа}$$

4.1.2 Модуль продольной упругости определяется по таблице В.1 стандарта [31] по формуле линейной интерполяции, сходной с (4.2). Значения модуля на границах температурного диапазона берутся из таблицы. Таким образом, для рабочих условий и для условий испытаний модуль продольной упругости стали 12Х18Н10Т принимается равным $2 \cdot 10^5$ МПа, поскольку в границах температурного диапазона от 20 до 100°C значения модуля упругости одинаковы, а потому нет необходимости в линейной интерполяции.

4.1.3 Коэффициент линейного расширения α определяется по таблице Г.1 стандарта [31] и принимается для выбранной стали равным $16,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Так как данный коэффициент указывается для температурного диапазона от 20 до 100°C, позволительно использовать его как для рабочих условий, так и для условий гидравлических испытаний.

4.2 Заключение по выбору конструкционных материалов

Основные характеристики конструкционных материалов, полученные в соответствии с [26, 31, 32], а также методом линейной интерполяции на основе этих источников, приведены в сводной таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики выбранных конструкционных материалов

Марка стали	t, °C	$\sigma_{д}$, МПа	E, МПа	α , $^\circ\text{C}^{-1}$
12Х18Н10Т	20	218	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
	67,2	178	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
	70	155	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
15ХМ	20	155	$2,10^5$	$11,9 \cdot 10^{-6}$
	70	153,5	$2,06 \cdot 10^5$	$11,9 \cdot 10^{-6}$
20	20	147	$1,99 \cdot 10^5$	$11,6 \cdot 10^{-6}$
	59,5	143	$1,91 \cdot 10^5$	$11,6 \cdot 10^{-6}$

Отдельно зафиксируем следующие данные по фторопласту-4 в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики выбранных неметаллических конструкционных материалов

Материал	$\sigma_{ср}$, МПа	E _{ср} , МПа	α , $^\circ\text{C}^{-1}$
фторопласт-4	11,8	686	$25 \cdot 10^{-5}$

где $\sigma_{ср}$ – разрушающее напряжение, МПа, E_{ср} – модуль упругости на сжатие, МПа.

4.3 Определение прибавок к толщине на различные разрушения

В соответствии с пособием [24] прибавка к толщине обечайки, крышки днища и т.д. рассчитывается как сумма прибавок на различные виды разрушений. Выделим в формуле три основных слагаемых:

$$c = c_k + c_э + c_d \quad (4.5)$$

где c_k – прибавка к толщине стенки на коррозию, мм; $c_э$ – прибавка к толщине стенки на эрозию, мм; c_d – прибавка к толщине стенки на другие виды разрушений, мм [24].

Прибавка к толщине стенки на коррозию рассчитывается по формуле:

$$c_k = П \cdot T_э \quad (4.6)$$

где $П$ – глубинный показатель коррозии стали, мм/год; $T_э$ – срок эксплуатации аппарата, год.

Значительным коррозионным разрушениям подвержены детали, изготовленные из сталей 12Х18Н10Т и 15ХМ ввиду контакта с реакционной массой и охлаждающей водой. Показатели глубинной коррозии этих сталей $П$ равными 0,1 мм/год [24]. По пособию [24] принимаем срок эксплуатации $T_э$ равным 20 годам. Таким образом, для сталей:

$$c_k = 0.1 \cdot 20 = 2 \text{ мм}$$

По рекомендации пособия [24] пренебрежём прибавками к толщине на эрозию и дополнительные виды разрушений и примем общие прибавки для рубашки и обечайки равными 2 мм.

4.4. Выводы по выбору конструкционных материалов

В соответствии с рекомендациями литературных источников в рамках данного раздела были произведены следующие решения:

- принять сталь 12Х18Н10Т в качестве материала для изготовления корпуса, концевых элементов, фланцевого соединения, штуцеров и перемешивающего устройства аппарата;
- принять сталь 15ХМ в качестве материала для изготовления теплообменной рубашки;
- принять сталь 20 в качестве материала для изготовления крепёжных элементов фланцевых соединений;

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

- принять фторопласт-4 в качестве материала для прокладки во фланцевом соединении;
- принять единую для сталей прибавку на различные виды разрушений, равную 2 мм.

Характеристики материалов, необходимые для проведения механического расчёта, приведены в таблицах 4 и 5, к которым можно будет обращаться впоследствии.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

					ФЮРА.061526.001 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Студент	Полонский М.С.				Механический расчет реактора синтеза полипропилена				
Руковод.	Беляев В.М.								
Конс.	Беляев В.М.								
Н. Контр.									
Руков. ООП	Краснокутская Е.А.								
					Лит.	Лист	Листов		
					Д		51	64	

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр обечайки, мм, $D = 1800$;
- внутреннее рабочее давление, МПа, $p_{\text{раб}} = 0,7$;
- плотность смеси в реакторе, кг/м^3 , $\rho = 776,5$;
- высота заполнения реактора, м, $h_{\text{зап}} = 3,78$;
- допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т для условий гидравлических испытаний, МПа, $\sigma_{d,20} = 218$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]).

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки цилиндрической обечайки, чтобы была обеспечена прочность данной конструкции. Проверкой устойчивости для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p \leq p_d \quad (5.1)$$

где p – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа; p_d – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [33, 34].

Проверкой прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{\text{и}} \leq p_{d, \text{и}} \quad (5.2)$$

где $p_{\text{и}}$ – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа; $p_{d, \text{и}}$ – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [33].

5.1.1 Расчётное давление при рабочих условиях:

$$p = p_{\text{раб}} + \frac{\rho \cdot g \cdot h_{\text{зап}}}{10^6} \quad (5.3)$$

где ρ – плотность смеси в реакторе, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; $h_{\text{зап}}$ – высота заполнения реактора, м [31].

Тогда:

$$p = 0.7 + \frac{776.5 \cdot 9.81 \cdot 3.78}{10^6} = 0.729 \text{ МПа}$$

5.1.2 Пробное давление для гидравлических испытаний аппарата:

$$p_{\text{и}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{\sigma_{d,20}}{\sigma_d} \quad (5.4)$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

где p – расчетное давление при рабочих условиях, МПа; σ_d – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{d,20}$ – допускаемое напряжение материала аппарата при условиях гидравлического испытания, МПа [31].

Тогда:

$$p_H = 1.25 \cdot 0.729 \cdot \frac{218}{155} = 1.282 \text{ МПа}$$

5.1.3 Расчетная толщина цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [33]:

$$s_p = \max \left(\frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi - p}, \frac{p_H \cdot D}{2 \cdot \sigma_{d,20} \cdot \phi - p_H} \right) \quad (5.5)$$

где D – внутренний диаметр аппарата, мм; p – расчетное давление, МПа; p_H – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; σ_d – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{d,H}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, ϕ – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для цилиндрической обечайки рубашки равным [31, 33].

Тогда:

$$s_p = \max \left(\frac{0.729 \cdot 1800}{2 \cdot 155 - 0.729}, \frac{1.282 \cdot 1800}{2 \cdot 218 - 1.282} \right) = 5.308 \text{ мм}$$

5.1.4 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки:

$$s \geq s_p + c \quad (5.6)$$

где c – прибавка на различные виды разрушений, мм [33].

Тогда:

$$s \geq 5.308 + 2 = 7.308 \text{ мм}$$

Примем ближайшее стандартное значение исполнительной толщины обечайки, а именно 8 мм.

5.1.5 Допускаемое давление для рабочих условий [33]:

$$p_d = \frac{[2 \cdot \sigma_d \cdot \phi \cdot (s - c)]}{D + (s - c)} \quad (5.7)$$

Тогда:

$$p_d = \frac{2 \cdot 155 \cdot (8 - 2)}{1800 + (8 - 2)} = 1.03 \text{ МПа}$$

5.1.6 Допускаемое давление для условий испытания [33]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

$$p_{д.и} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.20} \cdot \phi \cdot (s - c)]}{D + (s - c)} \quad (5.8)$$

Тогда:

$$p_{д.и} = \frac{2 \cdot 218 \cdot (8 - 2)}{1800 + (8 - 2)} = 1.449 \text{ МПа}$$

5.1.7 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий

$$p = 0.729 < 1.03 = p_{д}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие устойчивости выполняется, а надёжность цилиндрической обечайки для рабочих условий обеспечена.

5.1.8 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$p_{и} = 1.282 < 1.449 = p_{д.и}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие устойчивости выполняется, а надёжность цилиндрической обечайки для условий испытаний обеспечена.

5.1.9 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [33]:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{8 - 2}{1800} = 0.003 < 0.1 \quad (5.9)$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины обечайки выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина обечайки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

5.2 Расчёт толщины стенки эллиптических днища и крышки

Название элементов – эллиптические днище и крышка. Номера позиций на расчётной модели – 8 и 9.

Расчётные схемы эллиптических днища и крышки представлены на рисунках 8 и 9.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

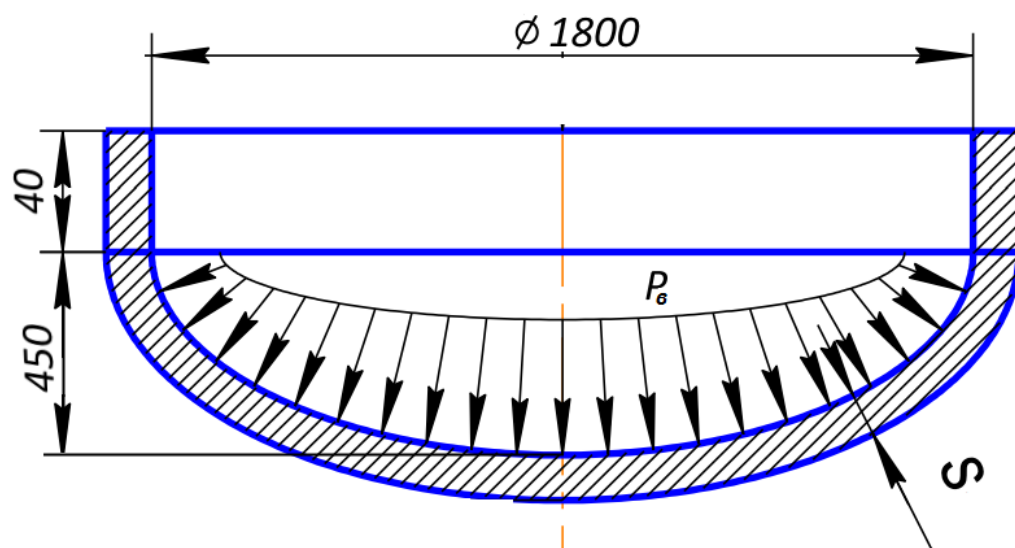


Рисунок 8 – Расчётная схема эллиптического днища

где p_v – расчётное избыточное давление в рабочих условиях или пробное давление в условиях гидравлического испытания, МПа; s – исполнительная толщина эллиптического днища, мм.

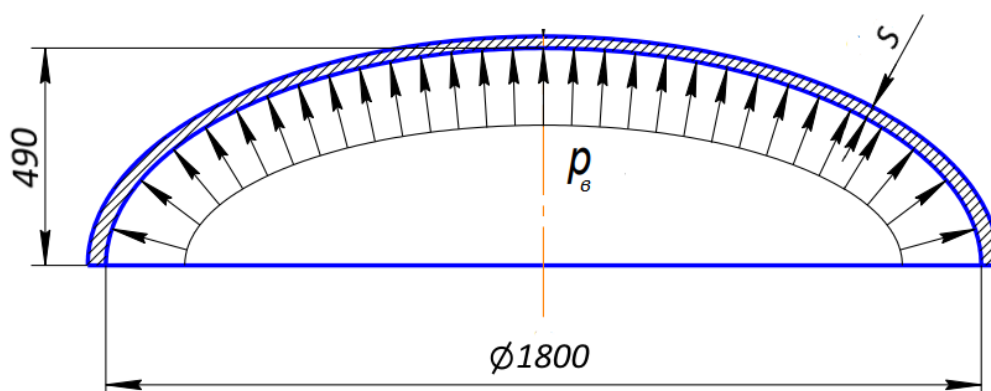


Рисунок 9 – Расчетная схема эллиптической крышки

где p_v – расчётное избыточное давление в рабочих условиях или пробное давление в условиях гидравлического испытания, МПа; s – исполнительная толщина эллиптического днища, мм.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний радиус днища или крышки, мм, $R = 1800$;
- внутренняя высота выпуклой части днища или крышки, мм, $H = 450$;
- высота отбортовки днища или крышки, мм, $h_0 = 40$;
- внутреннее расчётное давление, МПа, $p = 0,729$ (рассчитано в пункте 5.1);
- пробное давление при гидравлическом испытании, МПа, $p_{\text{и}} = 1,282$ (рассчитано

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.061526.001 ПЗ

Лист

55

в пункте 5.1);

- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для условий гидравлических испытаний, МПа, $\sigma_{д.20} = 218$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]).

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки эллиптических днища и крышки, чтобы была обеспечена прочность данных конструкций. Проверкой прочности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p \leq p_{д.1} \quad (5.10)$$

где p – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа; $p_{д.1}$ – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [33, 34].

Проверкой прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{и} \leq p_{д1.и} \quad (5.11)$$

где $p_{и}$ – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа; $p_{д1.и}$ – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [33].

Ввиду того, что днище и крышка работают в одинаковых условиях, их конструкция также будет идентичной, в связи с чем расчёт будет приведён только один раз.

5.2.1 Расчётная толщина эллиптического днища, нагруженного внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [33]:

$$s_{1.p} = \max \left(\frac{p \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - 0.5 \cdot p}, \frac{p_{и} \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20} - 0.5 \cdot p_{и}} \right) \quad (5.12)$$

где R – внутренний радиус эллиптического днища, мм; p – расчётное давление, МПа; $p_{и}$ – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; σ_d – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.и}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, ϕ – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для эллиптического днища равным 1 [31, 33].

Тогда:

$$s_{1.p} = \max \left(\frac{0.729 \cdot 1800}{2 \cdot 155 - 0.5 \cdot 0.729}, \frac{1.282 \cdot 1800}{2 \cdot 218 - 0.5 \cdot 1.282} \right) = 5.3 \text{ мм}$$

5.2.2 Исполнительная толщина стенки эллиптического днища:

$$s_1 \geq s_{1.p} + c \quad (5.13)$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

где c – прибавка на различные виды разрушений, мм [33].

Тогда:

$$s_1 \geq 5.3 + 2 = 7.3 \text{ мм}$$

Примем ближайшее стандартное значение исполнительной толщины днища, а именно 8 мм [35].

5.2.3 Допускаемое давление для рабочих условий [33]:

$$p_{д.1} = \frac{2(s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d}{R + 0.5(s_1 - c)} \quad (5.14)$$

Тогда:

$$p_{д.1} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 155}{1800 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 1.032 \text{ МПа}$$

5.2.4 Допускаемое давление для условий испытания [33]:

$$p_{д.1.и} = \frac{2(s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20}}{R + 0.5(s_1 - c)} \quad (5.15)$$

Тогда:

$$p_{д.1.и} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 218}{1800 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 1.451 \text{ МПа}$$

5.2.5 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$p = 0.729 < 1.032 = p_{д.1}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, и надёжность эллиптических днища и крышки для рабочих условий обеспечена.

5.2.6 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$p_{и} = 1.282 < 1.451 = p_{д.1.и}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, а надёжность эллиптических днища и крышки для условий испытаний обеспечена.

5.2.7 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [33]:

$$0.002 < \frac{s_1 - c}{1800} = \frac{8 - 2}{1800} = 0.003 < 0.1, \quad (5.16)$$

$$0.2 < \frac{H}{D} = \frac{450}{1800} = 0.25 < 0.5 \quad (5.17)$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища и крышки выполняются.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина эллиптических днища и крышки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

5.3 Расчёт толщины стенки гладкой теплообменной рубашки

Названия элементов – цилиндрическая обечайка и днище гладкой теплообменной рубашки. Номера позиций на расчётной модели – 10 и 11.

Расчётные схемы для обечайки и днища рубашки представлены на рисунках 10 и 11.

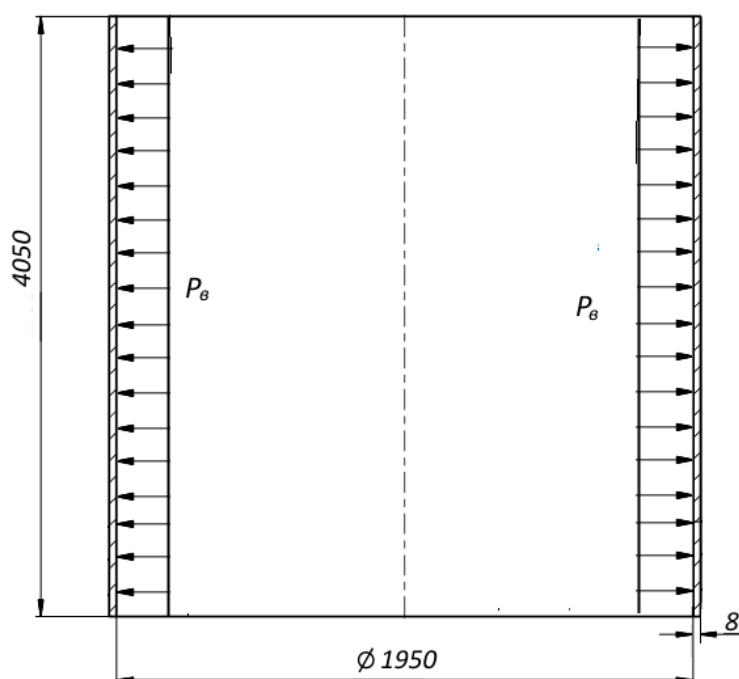


Рисунок 10 – Расчётная схема обечайки теплообменной рубашки

где p_v – расчётное давление пара в рубашке при рабочих условиях либо пробное давление воды при гидравлических испытаниях, МПа.

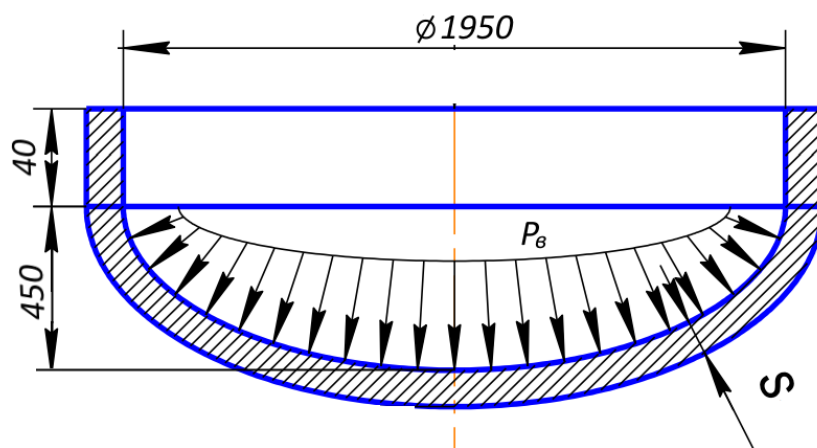


Рисунок 11 – Расчётная схема днища теплообменной рубашки

где p_v – расчётное давление пара в рубашке при рабочих условиях либо пробное давление воды при гидравлических испытаниях, МПа; s – исполнительная толщина стенки днища теплообменной рубашки, мм.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр рубашки, мм, $D_p = 1950$;
- внутренний радиус эллиптического элемента рубашки, мм, $R_p = 1950$;
- высота отбортованной части эллиптического элемента рубашки, мм, $h_{0p} = 40$;
- внутренняя высота выпуклой части эллиптического элемента рубашки, мм, $H_p = 487,5$;
- внутреннее рабочее давление, МПа, $p_p = 0,1$;
- допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 153,5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 15ХМ для условий гидравлических испытаний, МПа, $\sigma_{d,20} = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]).

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки рубашки, чтобы была обеспечена прочность данной конструкции. Условием прочности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p_p \leq p_{d.p} \quad (5.18)$$

где p_p – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа; $p_{d.p}$ – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [33].

Условием прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{p.и} \leq p_{d.p.и} \quad (5.19)$$

где $p_{р.и}$ – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;
 $p_{д.р.и}$ – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [33].

5.3.1 Пробное давление для гидравлических испытаний рубашки [31]:

$$p_{р.и} = 1.25 \cdot p_p \cdot \frac{\sigma_{д.р.20}}{\sigma_{д.р}} \quad (5.20)$$

где p_p – расчетное давление при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.р}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.р.20}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, МПа.

Тогда:

$$p_{р.и} = 1.25 \cdot 0.1 \cdot \frac{155}{153.5} = 0.126 \text{ МПа}$$

Примем в качестве значения пробного давления минимально допустимое, а именно 0,2 МПа [27].

5.3.2 Расчётная толщина цилиндрической обечайки рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [33]:

$$s_{p.p} = \max \left(\frac{p_p \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi - p_p}, \frac{p_{р.и} \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{д.р.20} \cdot \phi - p_{р.и}} \right) \quad (5.21)$$

где D_p – внутренний диаметр рубашки, мм; p_p – расчётное давление, МПа; $p_{р.и}$ – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; $\sigma_{д.р}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.р.и}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, ϕ – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для цилиндрической обечайки рубашки равным 1 [31, 33].

Тогда:

$$s_{p.p} = \max \left(\frac{0.1 \cdot 1950}{2 \cdot 153.5 - 0.1}, \frac{0.2 \cdot 1950}{2 \cdot 155 - 0.2} \right) = 1.259 \text{ мм}$$

5.3.3 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки рубашки:

$$s_p \geq s_{p.p} + c \quad (5.22)$$

где c – прибавка на различные виды разрушений, мм [33].

Тогда:

$$s_p \geq 1.259 + 2 = 3.259 \text{ мм}$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

Для соблюдения условий устойчивости и обеспечения надёжности конструкции примем исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки равной 8 мм.

5.3.4 Допускаемое давление для рабочих условий [33]:

$$p_{д.р} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi \cdot (s_p - c)]}{D_p + (s_p - c)} \quad (5.23)$$

Тогда:

$$p_{д.р} = \frac{2 \cdot 153.5 \cdot (8 - 2)}{1950 + (8 - 2)} = 0.942 \text{ МПа}$$

5.3.5 Допускаемое давление для условий испытания [33]:

$$p_{д.р.и} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р.и} \cdot \phi \cdot (s_p - c)]}{D_p + (s_p - c)} \quad (5.24)$$

Тогда:

$$p_{д.р.и} = \frac{2 \cdot 155 \cdot (8 - 2)}{1950 + (8 - 2)} = 0.951 \text{ МПа}$$

5.3.6 Расчётная толщина эллиптического элемента рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [33]:

$$s_{1.p.p} = \max \left(\frac{p_p \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р} - 0.5 \cdot p_p}, \frac{p_{р.и} \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р.и} - 0.5 \cdot p_{р.и}} \right) \quad (5.25)$$

где R_p – внутренний радиус эллиптического элемента рубашки, мм; p_p – расчётное давление, МПа; $p_{р.и}$ – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; $\sigma_{д.р}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.р.и}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, ϕ – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для эллиптического элемента рубашки равным 1 [31, 33].

Тогда:

$$s_{1.p.p} = \max \left(\frac{0.1 \cdot 1950}{2 \cdot 153.5 - 0.5 \cdot 0.1}, \frac{0.2 \cdot 1950}{2 \cdot 155 - 0.5 \cdot 0.2} \right) = 1.258 \text{ мм}$$

5.3.7 Исполнительная толщина стенки эллиптического элемента рубашки:

$$s_{1p} \geq s_{1p.p} + c \quad (5.26)$$

где c – прибавка на различные виды разрушений, мм [33].

Тогда:

$$s_{1p} \geq 1.258 + 2 = 3.258 \text{ мм}$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

В соответствии со стандартом на эллиптические отбортованные днища [35], примем ближайшую исполнительную толщину для данного диаметра, а именно 8 мм.

5.3.8 Допускаемое давление для рабочих условий [33]:

$$p_{д.1p} = \frac{2(s_{1p} - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р}}{R_p + 0.5(s_{1p} - c)} \quad (5.27)$$

Тогда:

$$p_{д.1p} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 153.5}{1950 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 0.943 \text{ МПа}$$

5.3.9 Допускаемое давление для условий испытания [33]:

$$p_{д.1p.и} = \frac{2(s_{1p} - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р.20}}{R_p + 0.5(s_{1p} - c)} \quad (5.28)$$

Тогда:

$$p_{д.1p.и} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 155}{1950 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 0.952 \text{ МПа}$$

5.3.10 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$p_p = 0.1 < 0.942 = p_{д.р},$$

$$p_p = 0.1 < 0.943 = p_{д.1p}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, а надёжность рубашки для рабочих условий обеспечена.

5.3.11 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$p_{р.и} = 0.2 < 0.951 = p_{д.р.и},$$

$$p_{р.и} = 0.2 < 0.952 = p_{д.1p.и}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, а надёжность рубашки для условий испытаний обеспечена.

5.3.12 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [33]:

$$0.002 < \frac{s_p - c}{D} = \frac{8 - 2}{1950} = 0.003 < 0.1,$$

$$0.002 < \frac{s_{1p} - c}{D} = \frac{8 - 2}{1950} = 0.003 < 0.1$$

$$0.2 < \frac{H}{D} = \frac{487.5}{1950} = 0.25 < 0.5$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины рубашки выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина обечайки и днища рубашки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

5.4 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, эллиптическое днище корпуса. Номера позиций на расчётной модели – 7 и 9.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем представлена на рисунке 12.

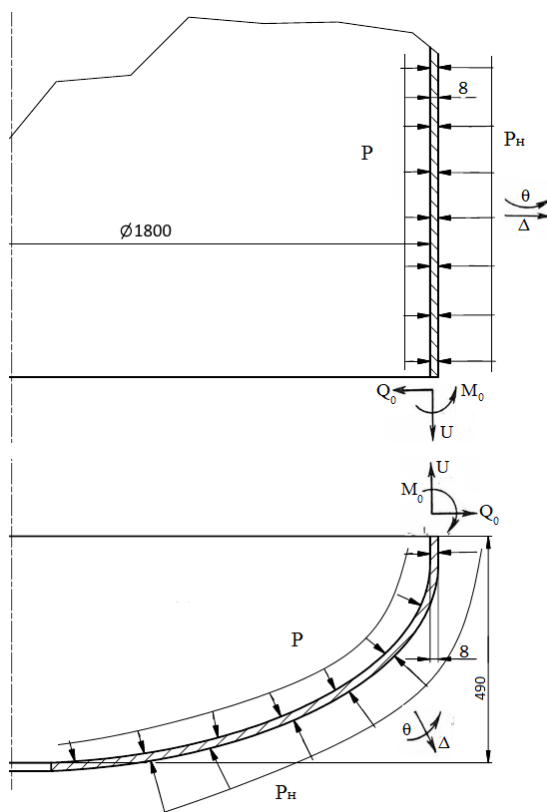


Рисунок 12 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем

где P – внутреннее давление, действующее на обечайки со стороны среды в аппарате, Па; P_n – внешнее давление, действующее на обечайки со стороны теплоносителя в рубашке, Па; Q_0 – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м; M_0 – краевой момент, действующий на соединённые обечайки, Н*м; U – радиальное усилие на краю обечайки, Н; Δ

– краевые радиальные деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м; θ – краевые угловые деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, $^{\circ}$.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, м, $D = 1,8$;
- радиус аппарата, м, $R = 0,9$;
- первый радиус эллипса крышки, м, $a = 0,9$;
- второй радиус эллипса крышки, м, $b = 0,45$;
- высота аппарата, м, $H = 4,2$;
- толщина стенки обечайки аппарата, м, $s = 0,008$ (пункт 5.1);
- толщина стенки днища, м, $s_d = 0,008$ (пункт 5.2);
- рабочее давление в корпусе, Па, $P = 700000$;
- рабочее давление в рубашке, Па, $P_p = 100000$;
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 155 \cdot 10^6$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, $^{\circ}\text{C}$, $t_c = 70$;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный, $\varphi = 1$ [31];
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м, $c = 0,002$ (пункт 4.3);
- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный, $n_p = 2,4$ [31];
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный, $n_{\text{и}} = 1,8$ [31];
- модуль упругости стали 12X18H10T при рабочей температуре среды, Па, $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный, $\mu = 0,3$ [34].

Целью выполнения расчёта является прочностная проверка того, выдержит ли соединение цилиндрической обечайки с днищем возникающих при сопряжении краевых напряжений. Условием прочности соединения является выполнение следующего условия:

$$\sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{кр.д}} \quad (5.29)$$

где σ_{max} – максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па; $\sigma_{\text{кр.д}}$ – допускаемое краевое напряжение, Па [34].

Для определения Q_0 и M_0 составляются уравнения совместности радиальных и

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

угловых деформаций. Сущность этих уравнений в том, что для нормальной работы аппарата в узле сопряжения не должно быть никаких относительных перемещений сопрягаемых деталей.

Уравнения совместности деформаций для места стыка обечайки с эллиптическим днищем при воздействии внутреннего и внешнего давления:

$$\begin{cases} -\Delta_p^u + \Delta_{Q0}^u - \Delta_{M0}^u = -\Delta_p^3 - \Delta_{Q0}^3 - \Delta_{M0}^3 \\ -\theta_p^u + \theta_{Q0}^u - \theta_{M0}^u = \theta_p^3 + \theta_{Q0}^3 + \theta_{M0}^3 \end{cases} \quad (5.30)$$

где $\Delta_p^u, \Delta_{Q0}^u, \Delta_{M0}^u, \theta_p^u, \theta_{Q0}^u, \theta_{M0}^u$ – соответственно радиальные и угловые деформации края цилиндрической обечайки под действием нагрузок p, Q_0 и M_0 соответственно; где $\Delta_p^3, \Delta_{Q0}^3, \Delta_{M0}^3, \theta_p^3, \theta_{Q0}^3, \theta_{M0}^3$ – соответственно радиальные и угловые деформации края цилиндрической обечайки под действием нагрузок p, Q_0 и M_0 соответственно [34].

Формулы для определения радиальных и угловых деформаций берутся в соответствии с таблицей из пособия [34].

5.5.1 Коэффициент затухания:

$$\beta = \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[R \cdot (s - c)]^2}} \quad (5.31)$$

Тогда для цилиндрической обечайки и эллиптического днища имеем:

$$\beta = \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[R \cdot (s - c)]^2}} = 17.492 \text{ 1/м},$$

$$\beta_3 = \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[a \cdot (s_3 - c)]^2}} = 17.492 \text{ 1/м}$$

5.5.2 Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки [34]:

$$\Delta_{цPp} = \frac{(2-\mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s-c)} \cdot P_p = 5.57 \times 10^{-5} \quad , \quad (5.32)$$

$$\Delta_{цQ0} = 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s-c) \cdot E} = 2.293 \times 10^{-8} \quad , \quad (5.33)$$

$$\Delta_{цP} = \frac{(2-\mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s-c)} \cdot P = 3.899 \times 10^{-4} \quad , \quad (5.34)$$

$$\Delta_{цM0} = 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s-c) \cdot E} = 4.01 \times 10^{-7} \quad , \quad (5.35)$$

$$\theta_{цPp} = 0 \quad ,$$

$$\theta_{цP} = 0 \quad ,$$

$$\theta_{цQ0} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s-c) \cdot E} = 4.01 \times 10^{-7} \quad , \quad (5.36)$$

$$\theta_{цM0} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s-c) \cdot E} = 1.403 \times 10^{-5} \quad (5.37)$$

5.5.3 Угловые и линейные деформации эллиптической крышки [34]:

$$\Delta_{эPp} = P_p \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_э - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -7.536 \times 10^{-5} \quad , \quad (5.38)$$

$$\Delta_{эP} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_э - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -5.275 \times 10^{-4} \quad , \quad (5.39)$$

$$\Delta_{эQ0} = 2 \cdot \beta_э \cdot \frac{a^2}{(s_э - c) \cdot E} = 2.293 \times 10^{-8} \quad , \quad (5.40)$$

$$\Delta_{эM0} = 2 \cdot \beta_э^2 \cdot \frac{a^2}{(s_э - c) \cdot E} = 4.01 \times 10^{-7} \quad , \quad (5.41)$$

$$\theta_{эPp} = 0 \quad ,$$

$$\theta_{эP} = 0 \quad ,$$

$$\theta_{эQ0} = 2 \cdot \beta_э^2 \cdot \frac{a^2}{(s_э - c) \cdot E} = 4.01 \times 10^{-7} \quad , \quad (5.42)$$

$$\theta_{эM0} = 4 \cdot \beta_э^3 \cdot \frac{a^2}{(s_э - c) \cdot E} = 1.403 \times 10^{-5} \quad (5.43)$$

5.5.4 Подставив значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений (5.56) и решив её при помощи ПЭВМ, получим следующие значения нагрузок:

$$Q_0 = 1,715 \cdot 10^4 \text{ Н/м},$$

$$M_0 = 0$$

5.5.5 Суммарное меридиональное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{m\bar{z}} = -\sigma_{Ppm\bar{z}} + \sigma_{Pm\bar{z}} + \sigma_{Q0m\bar{z}} + \sigma_{M0m\bar{z}} \quad (5.44)$$

где $\sigma_{Ppm\bar{z}}$, $\sigma_{Pm\bar{z}}$, $\sigma_{Q0m\bar{z}}$, $\sigma_{M0m\bar{z}}$ – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками Q_0 и M_0 . [34].

Тогда:

$$\sigma_{m\bar{z}1} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\bar{z}} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\bar{z}} - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\bar{z}} - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па},$$

$$\sigma_{m\bar{z}2} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\bar{z}} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\bar{z}} - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\bar{z}} - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па},$$

$$\sigma_{m\bar{z}} = \max(|\sigma_{m\bar{z}1}|, |\sigma_{m\bar{z}2}|) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}$$

5.5.6 Суммарное кольцевое напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{t\bar{z}} = -\sigma_{Ppt\bar{z}} + \sigma_{Pt\bar{z}} + \sigma_{Q0t\bar{z}} + \sigma_{M0t\bar{z}} \quad (5.45)$$

где $\sigma_{Ppt\bar{z}}$, $\sigma_{Pt\bar{z}}$, $\sigma_{Q0t\bar{z}}$, $\sigma_{M0t\bar{z}}$ – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками Q_0 и M_0 . [34].

Тогда:

$$\sigma_{t\bar{z}1} = -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\bar{z}} - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\bar{z}} - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\bar{z}} \cdot \frac{a}{(s_{\bar{z}} - c)} +$$

$$+ 2 \cdot M_0 \cdot \beta_{\bar{z}}^2 \cdot \frac{a}{(s_{\bar{z}} - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_{\bar{z}} - c)^2} = -6.343 \times 10^{-5} \text{ Па},$$

$$\sigma_{t\bar{z}2} = -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\bar{z}} - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\bar{z}} - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\bar{z}} \cdot \frac{a}{(s_{\bar{z}} - c)} +$$

$$+ 2 \cdot M_0 \cdot \beta_{\bar{z}}^2 \cdot \frac{a}{(s_{\bar{z}} - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_{\bar{z}} - c)^2} = -6.343 \times 10^{-5} \text{ Па},$$

$$\sigma_{t3} = \max(|\sigma_{t31}|, |\sigma_{t32}|) = 6.343 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

5.5.7 Суммарное меридиональное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{mo} = -\sigma_{Ppmo} + \sigma_{Pmo} - \sigma_{Q0mo} + \sigma_{M0mo} \quad (5.46)$$

где σ_{Ppmo} , σ_{Pmo} , σ_{Q0mo} , σ_{M0mo} – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками Q_0 и M_0 . [34].

Тогда:

$$\sigma_{mo1} = -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па},$$

$$\sigma_{mo2} = -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па},$$

$$\sigma_{mo} = \max(|\sigma_{mo1}|, |\sigma_{mo2}|) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}$$

5.5.8 Суммарное кольцевое напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{to} = -\sigma_{Ppto} + \sigma_{Pto} - \sigma_{Q0to} + \sigma_{M0to} \quad (5.47)$$

где σ_{Ppto} , σ_{Pto} , σ_{Q0to} , σ_{M0to} – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками Q_0 и M_0 . [34].

Тогда:

$$\begin{aligned} \sigma_{to1} = & -P_p \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} + \\ & + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 6.343 \times 10^{-5} \text{ Па}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{to2} = & -P_p \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} - \\ & - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 6.343 \times 10^{-5} \text{ Па}, \end{aligned}$$

$$\sigma_{to} = \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 6.343 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

5.5.9 Допускаемое напряжение на краю элемента [34]:

$$\sigma_{кр.д} = 1.3 \cdot \sigma_d = 2.763 \times 10^8 \text{ Па} \quad (5.48)$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

$$\sigma_{\max э} = \max(\sigma_{мэ}, \sigma_{тэ}) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{\max о} = \max(\sigma_{мо}, \sigma_{то}) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}$$

5.5.10 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{\max э} = 4.5 \cdot 10^7 < 2.015 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д.},$$

$$\sigma_{\max о} = 4.5 \cdot 10^7 < 2.015 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д.}$$

Условие прочности выполняется. Делаем вывод, что принятая в пунктах 5.1 и 5.2 исполнительная толщина цилиндрической обечайки и эллиптического днища корпуса, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

5.5 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища

Названия элементов – цилиндрическая обечайка рубашки, эллиптическое днище рубашки. Номера позиций на расчётной модели – 10 и 11.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки рубашки с её эллиптическим днищем представлена на рисунке 13.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

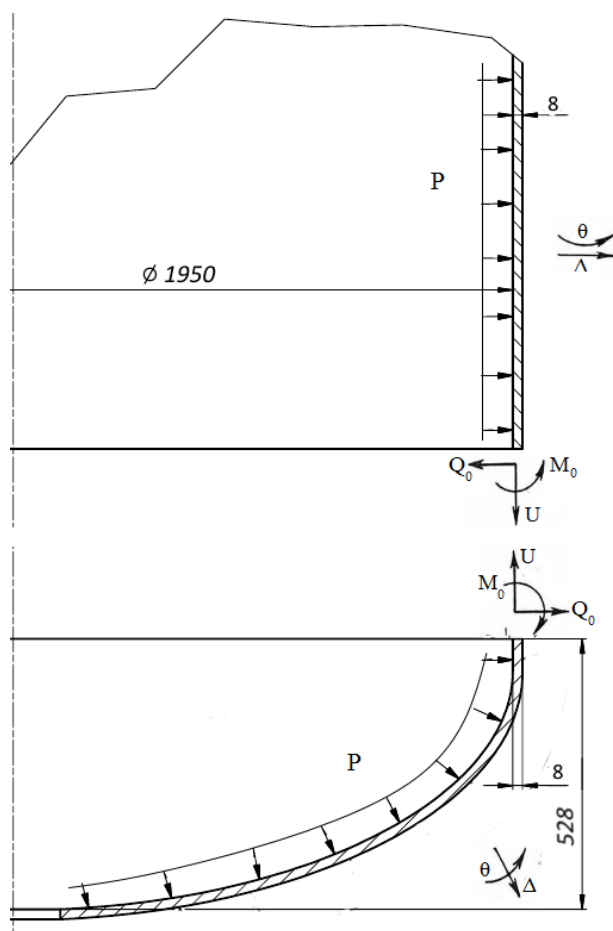


Рисунок 13 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки рубашки с её эллиптическим днищем

где P – внутреннее давление, действующее на обечайки со стороны теплоносителя в рубашке, Па; Q_0 – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м; M_0 – краевой момент, действующий на соединённые обечайки, Н*м; U – радиальное усилие на краю обечаек, Н; Δ – краевые радиальные деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м; θ – краевые угловые деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, °.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, м, $D = 1,95$;
- радиус аппарата, м, $R = 0,975$;
- первый радиус эллипса крышки, м, $a = 0,975$;
- второй радиус эллипса крышки, м, $b = 0,488$;
- толщина стенки обечайки рубашки, м, $s = 0,008$ (пункт 5.3);
- толщина стенки днища, м, $s_d = 0,008$ (пункт 5.3);
- рабочее давление в рубашке, Па, $P = 100000$;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.061526.001 ПЗ

Лист

70

- допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 153,5 \cdot 10^6$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °С, $t_c = 70$;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный, $\varphi = 1$ [31];
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м, $c = 0,002$ (пункт 4.3);
- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный, $n_p = 2,4$ [31];
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный, $n_{и} = 1,8$ [31];
- модуль упругости материала аппарата при рабочей температуре среды, Па, $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный, $\mu = 0,3$ [34].

Целью выполнения расчёта является прочностная проверка того, выдержит ли соединение цилиндрической обечайки с днищем возникающих при сопряжении краевых напряжений. Условием прочности соединения является выполнение следующего условия:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{кр.д}} \quad (5.49)$$

где σ_{\max} — максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па; $\sigma_{\text{кр.д}}$ — допускаемое краевое напряжение, Па [34].

Реализуемый принцип расчёта — тот же, что и в предыдущем подразделе.

5.5.1 Коэффициент затухания [34]:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[R \cdot (s - c)]^2}} = 16.806 \text{ 1/м},$$

$$\beta_{\text{э}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[a \cdot (s_{\text{э}} - c)]^2}} = 16.806 \text{ 1/м}$$

5.5.2 Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки [34]:

$$\Delta_{\text{цР}} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P = 6.537 \times 10^{-5},$$

$$\Delta_{\text{цQ0}} = 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 2.585 \times 10^{-8},$$

$$\Delta_{\text{цM0}} = 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 4.345 \times 10^{-7},$$

$$\theta_{\text{цР}} = 0,$$

$$\theta_{\text{цQ0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 4.345 \times 10^{-7},$$

$$\theta_{\text{цM0}} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 1.46 \times 10^{-5}$$

5.5.3 Угловые и линейные деформации эллиптической крышки [34]:

$$\Delta_{\text{эР}} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\text{э}} - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -8.845 \times 10^{-5},$$

$$\Delta_{\text{эQ0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}} \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 2.585 \times 10^{-8},$$

$$\Delta_{\text{эM0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 4.345 \times 10^{-7},$$

$$\theta_{\text{эР}} = 0,$$

$$\theta_{\text{эQ0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 4.345 \times 10^{-7},$$

$$\theta_{\text{эM0}} = 4 \cdot \beta_{\text{э}}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 1.46 \times 10^{-5}$$

5.5.4 Подставив значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений (5.56) и решив её при помощи ПЭВМ, получим следующие значения нагрузок:

$$Q_0 = 2,975 \cdot 10^3 \text{ Н/м},$$

$$M_0 = 0$$

5.5.5 Суммарное меридиональное напряжение на краю эллиптического днища [34]:

$$\sigma_{\text{мэ1}} = P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\text{э}} - c)^2} = 8.125 \times 10^6 \text{ Па},$$

$$\sigma_{\text{мэ2}} = P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\text{э}} - c)^2} = 8.125 \times 10^6 \text{ Па},$$

$$\sigma_{\text{мэ}} = \max(|\sigma_{\text{мэ1}}|, |\sigma_{\text{мэ2}}|) = 8.125 \times 10^6 \text{ Па}$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

5.5.6 Суммарное кольцевое напряжение на краю эллиптического днища [34]:

$$\begin{aligned}\sigma_{t\theta 1} &= P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\theta} - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\theta} \cdot \frac{a}{(s_{\theta} - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_{\theta}^2 \cdot \frac{a}{(s_{\theta} - c)} + \\ &+ 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_{\theta} - c)^2} = 3.688 \times 10^{-6} \text{ Па} , \\ \sigma_{t\theta 2} &= P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\theta} - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\theta} \cdot \frac{a}{(s_{\theta} - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_{\theta}^2 \cdot \frac{a}{(s_{\theta} - c)} - \\ &- 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_{\theta} - c)^2} = 3.688 \times 10^{-6} \text{ Па} , \\ \sigma_{t\theta} &= \max(|\sigma_{t\theta 1}|, |\sigma_{t\theta 2}|) = 3.688 \times 10^{-6} \text{ Па}\end{aligned}$$

5.5.7 Суммарное меридиональное напряжение на краю цилиндрической обечайки [34]:

$$\begin{aligned}\sigma_{m\theta 1} &= P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 8.125 \times 10^6 \text{ Па} , \\ \sigma_{m\theta 2} &= P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 8.125 \times 10^6 \text{ Па} , \\ \sigma_{m\theta} &= \max(|\sigma_{m\theta 1}|, |\sigma_{m\theta 2}|) = 8.125 \times 10^6 \text{ Па}\end{aligned}$$

5.5.8 Суммарное кольцевое напряжение на краю цилиндрической обечайки [34]:

$$\begin{aligned}\sigma_{t\theta 1} &= -P \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + \\ &+ 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = -3.688 \times 10^{-6} \text{ Па} , \\ \sigma_{t\theta 2} &= -P \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} +\end{aligned}$$

$$+ 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2} = -3.688 \times 10^{-6} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{to} = \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 3.688 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

5.5.9 Допускаемое напряжение на краю элемента [34]:

$$\sigma_{кр.д} = 1.3 \cdot \sigma_d = 1.996 \times 10^8 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища [34]:

$$\sigma_{maxэ} = \max(\sigma_{мэ}, \sigma_{тэ}) = 8.125 \times 10^6 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки [34]:

$$\sigma_{maxо} = \max(\sigma_{мо}, \sigma_{то}) = 8.125 \times 10^6 \text{ Па}$$

5.5.10 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{maxэ} = 8.125 \cdot 10^6 < 1.996 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д}$$

$$\sigma_{maxо} = 8.125 \cdot 10^6 < 1.996 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д}$$

Условие прочности выполняется. Делаем вывод, что принятая в пункте 5.3 исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки и эллиптического днища рубашки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

5.6 Расчёт сопряжения рубашки с корпусом

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, гладкая теплообменная рубашка. Номера позиций на расчётной модели – 7 и 10.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с теплообменной рубашкой представлена на рисунке 14.

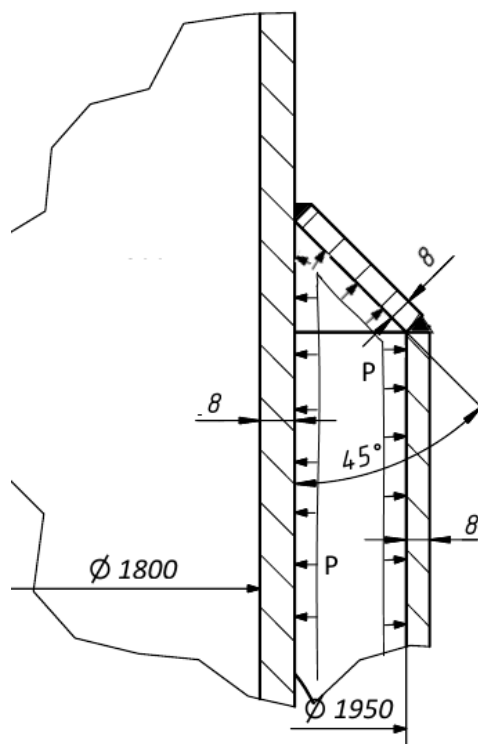


Рисунок 14 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с гладкой теплообменной рубашкой

где p – внутреннее давление теплоносителя в рубашке, МПа.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, мм, $D_1 = 1800$;
- внутренний диаметр рубашки, мм, $D_2 = 1950$;
- диаметр сопряжения рубашки с корпусом у днища, мм, $d_1 = 280$ [36];
- толщина стенки обечайки аппарата, мм, $s_1 = 8$ (пункт 5.1);
- толщина стенки обечайки рубашки, мм, $s_2 = 8$ (пункт 5.3);
- прибавка к толщине стенки, мм, $c = 2$ (пункт 4.3);
- угол сопряжения, °, $\alpha = 45$ [36];
- расстояние от середины стенки рубашки до наружной стенки аппарата, мм, $e_0 = 71$ [36];
- расчётное давление в аппарате, МПа, $p_{\text{кор}} = 0,729$ (пункт 5.1);
- рабочее давление в рубашке, МПа, $p_{\text{руб}} = 0,1$;
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для рабочих условий, МПа, $\sigma_{\text{д,кор}} = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 15XM для рабочих

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

условий, МПа, $\sigma_{д.руб} = 153,5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);

- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный, $\varphi_{т1} = 1$ [31].

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции сопряжения теплообменной рубашки с корпусом аппарата. Условием прочности является выполнение следующего условия:

$$p_{руб} \leq p_{д.руб} \quad (5.50)$$

где $p_{руб}$ – расчётное давление в рубашке при рабочих условиях, МПа; $p_{д.руб}$ – допускаемое давление в рубашке при рабочих условиях, МПа [36].

В соответствии с рекомендациями стандарта [36] был выбран тип сопряжения рубашки с корпусом при помощи конуса. Исполнительная толщина стенки сопряжения рассчитывается методом итераций в соответствии с методикой стандарта [36].

5.6.1 В первом приближении принимаем толщину сопряжения равной толщине стенки теплообменной рубашки. Вычислим по формулам стандарта [36] вспомогательные параметры.

5.6.2 Коэффициент осевого усилия [36]:

$$A = \frac{(D_1 \cdot D_2 - d_1^2)}{D_2^2} = 0.902 \text{ мм} \quad (5.51)$$

5.6.3 Коэффициент, учитывающий расстояние между корпусом сосуда и рубашкой [36]:

$$\varepsilon = \frac{e_0}{\sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)}} = 0.656 \quad (5.52)$$

5.6.4 Коэффициент радиуса конической отбортовки ρ принимаем равным нулю в соответствии с приложением А стандарта [36].

5.6.5 Коэффициент длины сопряжения при угле сопряжения 45° [36]:

$$\lambda = \varepsilon \cdot \sqrt{2} + 0.45 \cdot \rho = 0.928 \quad (5.53)$$

5.6.6 Коэффициент отношения прочности корпуса сосуда и рубашки [36]:

$$\chi = 1.25 \left[\frac{\sigma_{д.кор} \cdot (s_1 - c) \cdot \sqrt{D_1 \cdot (s_1 - c)}}{\sigma_{д.руб} \cdot (s_2 - c) \cdot \sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)}} \right] \cdot \left[\sqrt{1 - \frac{(p_{кор} \cdot D_1)}{2 \cdot \sigma_{д.кор} \cdot (s_1 - c)}} + \right]$$

$$+ \sqrt{1 - \frac{[(p_{\text{кор}} - p_{\text{руб}}) \cdot D_1]}{2 \cdot \sigma_{\text{д.кор}} \cdot (s_1 - c)}}] = 1.417 \quad (5.54)$$

5.6.7 Расчётные коэффициенты прочности сварного шва [36]:

$$\varphi_{p1} = \varphi_{T1} \cdot \frac{\min(\sigma_{\text{д.кор}}, \sigma_{\text{д.руб}})}{\sigma_{\text{д.руб}}} = 1 \quad (5.55)$$

$$\varphi_{p2} = 1$$

5.6.8 Коэффициент φ_{p2} принимается равным единице, поскольку исполнительная длина укрепления стенки рубашки в месте сопряжения с помощью конуса равна [36]:

$$l_R \geq 0.5 \cdot \sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)} = 54.083 \quad (5.56)$$

Примем величину l_R равной 95 мм.

5.6.9 Относительная эффективная несущая длина конуса [36]:

$$\mu = \min \left[\frac{\epsilon}{\sin(\alpha)}, \sqrt{\frac{(\varphi_{p1} + \varphi_{p2})}{4 \cdot \cos(\alpha)}} \right] = 0.841 \quad (5.57)$$

5.6.10 Коэффициент сопряжения с помощью конуса:

$$B = 2 \cdot \sqrt{\frac{(s_2 - c)}{D_2}} \cdot \min(X_1, X_2, X_3) \quad (5.58)$$

где X_1, X_2, X_3 – вспомогательные величины, определяемые относительно коэффициентов f_1, f_2, f_3, f_4 [36].

5.6.11 Первый коэффициент при выполнении условия [36]:

$$\lambda = 0.928 > \frac{|\chi - 1|}{2} = 0.208 \quad (5.59)$$

рассчитывается по следующей формуле [36]:

$$f_1 = 1 \cdot \left[1 + \lambda + \chi - \frac{(\chi - 1)^2}{4\lambda} \right] = 3.298 \quad (5.60)$$

5.6.12 Формула второго коэффициента выбирается исходя из угла сопряжения. Предварительно рассчитываются следующие вспомогательные величины [36]:

$$\epsilon_0 = 0.60 \cdot \sqrt{1 + 0.83 \cdot \rho + 0.37 \cdot \rho^2} = 0.6 \quad (5.61)$$

Поскольку ϵ больше, чем ϵ_0 , следующий вспомогательный параметр рассчитывается по формуле [36]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

$$z = 2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right) = 1.828 \quad (5.62)$$

Таким образом [36]:

$$f_2 = 0.71 + 0.52 \cdot \rho + \varepsilon \cdot z = 1.91 \quad (5.63)$$

5.6.13 Третий вспомогательный коэффициент [36]:

$$f_3 = 1 + \left[\frac{\left[12 \cdot \rho^3 \cdot \left(\frac{0.2}{\varepsilon} \right)^4 \right]}{12 \cdot \varepsilon + \rho^2 \cdot \max \left[0, \left(\frac{0.5}{\varepsilon} \right)^3 - 1 \right]} \right] = 1 \quad (5.64)$$

5.6.14 Формула для четвёртого вспомогательного коэффициента также берётся исходя из того, что угол сопряжения равен 45° [36].

$$f_4 = \max \left[1, \min \left[1, 0.8 + \left(\frac{6.0}{100 \cdot \varepsilon} \right) + \left(\frac{\rho}{2} \right) \cdot \min \left[1, \frac{\left(\frac{4}{3} \right)}{1 + \varepsilon \cdot [1 + \varepsilon \cdot (1 + 5.5 \cdot \varepsilon)]} \right] \right] \right] = 1 \quad (5.65)$$

5.6.15 Вспомогательные коэффициенты X_1 , X_2 , X_3 [36]:

$$X_1 = \left(\frac{\cos(\alpha)}{\varepsilon} \right) \cdot \left[\frac{(\varphi_{p1} + \varphi_{p2})}{4 \cdot \cos(\alpha)} \right] + \lambda \cdot f_1 = 4.06 \quad (5.66)$$

$$X_2 = f_2 \cdot \sqrt{1 + \varphi_{p2}} = 2.701 \quad (5.67)$$

$$X_3 = \chi \cdot f_3 + \left[\frac{(\varphi_{p1} + \varphi_{p2})}{4 \cdot \mu \cdot \cos(\alpha)} \right] + \mu \cdot f_4 = 3.098 \quad (5.68)$$

Тогда:

$$B = 2 \cdot \sqrt{\frac{(s_2 - c)}{D_2}} \cdot \min(X_1, X_2, X_3) = 0.3$$

5.6.16 Допускаемое давление в рубашке:

$$P_{\text{д.руб}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{д.руб}} \cdot (s_2 - c) \cdot \varphi_{п2}}{D_2 + (s_2 - c)} \cdot \frac{B}{A} = 0.313 \text{ МПа} \quad (5.69)$$

где $\varphi_{п2}$ – коэффициент прочности сварного шва рубашки, принимаемый равным единице [36].

5.6.17 Осуществим проверку критерия прочности:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

Условие прочности по допускаемому избыточному давлению выполняется.

Таким образом, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина сопряжения, равная 8 мм, обеспечивает необходимую надёжность конструкции.

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, эллиптическая крышка корпуса, фланцевое соединение. Номера позиций на расчётной модели – 7, 8, 12.

Расчётные схемы фланцевого соединения представлены на рисунках 15 и 16.



					<p style="text-align: center;"><i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i></p>	Лист
						79
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

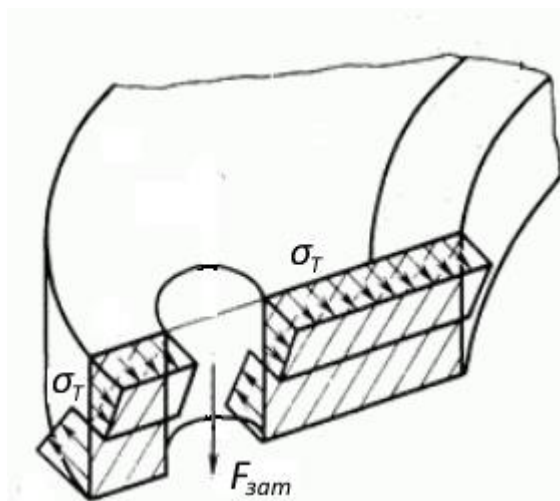


Рисунок 16 – Уточняющая расчётная схема фланцевого соединения крышки с корпусом

где P_0 – внешнее давление атмосферы на аппарат, МПа; F_s – усилие, действующее на болты со стороны среды аппарата, Н; $F_{зат}$ – усилие, действующее на болты при затяжке, Н; q – удельное давление обжатия прокладки, МПа; σ_R , σ_M , σ_T – соответственно радиальные, меридиональные и кольцевые напряжения в тарелке или обечайке фланца, МПа.

Исходные данные для расчёта [37, 38]:

- внутренний диаметр аппарата, мм, $D_1 = 1800$;
- наружный диаметр фланца, мм, $D_n = 1980$;
- диаметр болтовой окружности, мм, $D_6 = 1930$;
- диаметр середины прокладки, мм, $D_{сп} = 1864,5$;
- ширина прокладки, мм, $b_n = 17,5$;
- высота фланца, мм, $h = 95$;
- высота прокладки, мм, $h_n = 2$;
- толщина обечайки и крышки, мм, $s_0 = 8$ (пункты 5.1 и 5.2);
- диаметр болтов, мм, $d = 24$;
- число болтов, шт, $n = 84$;
- площадь поперечного сечения болта, мм², $f_6 = 324$;
- расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта, мм, $L_{60} = 174$;
- расчётное наружное давление на крышки, МПа, $P = 0,729$ (пункт 5.1);
- внешняя осевая сжимающая сила, Н, $F = 0$;
- внешний изгибающий момент, Н*мм, $M = 0$;
- прибавка к толщине стенки, мм, $c_0 = 2$;

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						80
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- температура среды в аппарате, °C, $t = 70$;
- рабочая температура фланца, °C, $t_f = 67,2$;
- рабочая температура болтов, °C, $t = 59,5$;
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при рабочих условиях, МПа, $\sigma_{д.ф} = 178$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при условиях испытаний, МПа, $\sigma_{20} = 218$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 20 при рабочих условиях, МПа, $\sigma_{д.б} = 143$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 20 при условиях испытаний, МПа, $\sigma_{д.б} = 147$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- модуль продольной упругости стали 12X18H10T при рабочих условиях, МПа, $E = 2,0 \cdot 10^5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- модуль продольной упругости стали 12X18H10T при условиях испытаний, МПа, $E = 2,0 \cdot 10^5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- модуль продольной упругости стали 20 при рабочих условиях, МПа, $E_б = 1,91 \cdot 10^5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- модуль продольной упругости стали 20 при условиях испытаний, МПа, $E_{20б} = 1,99 \cdot 10^5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент линейного расширения стали 12X18H10T, °C⁻¹, $\alpha_f = 16,6 \cdot 10^{-6}$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент линейного расширения стали 20, °C⁻¹, $\alpha_б = 11,6 \cdot 10^{-6}$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- прокладочный коэффициент, безразмерный, $m = 2,5$ [38];
- удельное давление обжатия прокладки, МПа, $q_{обж} = 10$ [38];
- допускаемое удельное давление на прокладку, МПа, $q_d = 40$ [38];
- коэффициент обжатия, безразмерный, $K_{обж} = 1$ [38];
- условный модуль сжатия прокладки, МПа, $E_{п} = 0,02 \cdot 10^5$ [38].

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции фланцевого соединения. Показателями механической надёжности являются прочность болтов при затяжке и в рабочих условиях, прочность прокладки, статическая прочность соединения при затяжке и в рабочих условиях, а также соответствия угла поворота фланца допускаемому значению. Данные критерии описываются следующими условиями:

$$\sigma_{61} \leq \sigma_{206} \quad (5.70)$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						81
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где σ_{61} – напряжение, возникающее в болтах при затяжке, МПа [38].

$$\sigma_{62} \leq \sigma_{д.6} \quad (5.71)$$

где σ_{62} – напряжение, возникающее в болтах при рабочих условиях, МПа [38].

$$q \leq q_d \quad (5.72)$$

где q – удельное давление на прокладку, МПа; q_d – допускаемое удельное давление на прокладку, МПа [38].

$$\sigma_{3\max} < K_T \cdot \sigma_{20} \quad (5.73)$$

$$\sigma_{P\max} < K_T \cdot \sigma_{д.ф} \quad (5.74)$$

где $\sigma_{3\max}$ – максимальное напряжение, возникающее в болтах при затяжке, МПа; $\sigma_{P\max}$ – максимальное напряжение, возникающее в болтах при рабочих условиях, МПа; K_T – коэффициент, учитывающий температурные деформации, принимаемый равным 1,3 [38].

$$\Theta \leq 1,3 \cdot \Theta_d \quad (5.75)$$

где Θ – величина угла поворота фланца, °; Θ_d – допускаемая величина угла поворота фланца, ° [38].

В соответствии с рекомендациями [34] по привалочной поверхности выбран тип фланца шип-паз, поскольку именно такой тип обеспечивает достаточную герметичность аппарата, содержащего агрессивные и токсичные среды. По стандарту [37] выбрана пара фланцев типа шип-паз и исполнения 2 и 3 в соответствии с диаметром аппарата, равным 1800 мм.

Весь дальнейший расчёт производится в соответствии со стандартом [38].

5.7.1 Эффективная ширина плоской прокладки для случая, когда реальная её ширина больше 15 мм:

$$b_0 = \text{Ceil}(3,8 \sqrt{b_{\Pi}}, 1) = 16 \text{ мм} \quad (5.76)$$

где ceil – функция округления в большую сторону [38].

5.7.2 Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке [38]:

$$P_{обж} = 0,5 \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 8,54 \times 10^4 \text{ МПа} \quad (5.77)$$

5.7.3 Усилие на прокладке в рабочих условиях $R_{п}$, необходимое для герметичности фланцевого соединения, для расчёта на наружное давление принимается равным нулю [38].

5.7.4 Суммарная площадь сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы [38]:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 2,722 \times 10^4 \text{ мм}^2 \quad (5.78)$$

5.7.5 Равнодействующая нагрузка от давления [38]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

$$Q_d = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P \quad Q_d = 1.99 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.79)$$

5.7.6 Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента [38]:

$$Q_{FM} = \max \left(\left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) = 0 \quad (5.80)$$

5.7.7 Податливость прокладки [38]:

$$y_{\Pi} = \frac{h_{\Pi} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\Pi}} = 9.756 \times 10^{-9} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (5.81)$$

5.7.8 Эффективная длина болта при определении податливости [38]:

$$L_6 = L_{60} + 0.28 \cdot d = 180.72 \text{ мм} \quad (5.82)$$

5.7.9 Податливость болтов [38]:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 3.337 \times 10^{-8} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (5.83)$$

5.7.10 Расчётные параметры фланцев [38]:

- параметр длины обечайки:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot S_0} = 120 \text{ мм} \quad (5.84)$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K = \frac{D_H}{D} = 1.1 \quad (5.85)$$

- коэффициенты, зависящие от размеров тарелки фланца [38]:

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.875, \quad (5.86)$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 22.347, \quad (5.87)$$

$$\beta_Y = \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 20.542, \quad (5.88)$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 10.524 \quad (5.89)$$

- коэффициенты β_F , β_V и f по рекомендациям стандарта [38] принимаем для плоского фланца типа шип-паз равными соответственно 0.91, 0.55 и 1;
- коэффициент λ [38]:

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 3.665 \quad (5.90)$$

5.7.11 Угловая податливость фланцев при затяжке [38]:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 8.891 \times 10^{-11} \quad (5.91)$$

5.7.12 Угловая податливость фланцев, нагруженных внешним изгибающим моментом [38]:

$$y_{\Phi H} = \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 2.754 \times 10^{-12} \quad (5.92)$$

5.7.13 Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами [38]:

$$C_F = \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1 \quad (5.93)$$

5.7.14 Приведённый диаметр фланца $D_{пр}$ принимаем равным внутреннему диаметру аппарата, а именно 1800 мм.

5.7.15 Плечо действия усилий в болтах для приварных плоских фланцев [38]:

$$b = 0.5(D_6 - D_{сп}) = 32.75 \text{ мм} \quad (5.94)$$

5.7.16 Плечо усилия от действия давления на фланец [38]:

$$e = 0.5 \cdot (D_{сп} - D - S_0) = 28.25 \text{ мм} \quad (5.95)$$

5.7.17 Эквивалентную толщину втулки плоских фланцев принимаем по рекомендации [38] равной толщине аппарата и крышки, а именно 14 мм.

5.7.18 Коэффициент жёсткости для плоских фланцев [38]:

$$\gamma = \frac{1}{y_\Pi + y_6 \cdot \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_\Phi \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 4.251 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{мм}} \quad (5.96)$$

5.7.19 Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для плоских фланцев с плоскими прокладками [38]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e \cdot y_{\Phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\Phi} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi}} = 1.662 \quad (5.97)$$

5.7.20 Коэффициент жёсткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом [38]:

$$\alpha_M = \frac{y_{\Phi} + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\Phi} + y_{\Pi} \cdot \left(\frac{D_{\Phi}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b^2} = 0.891 \quad (5.98)$$

5.7.21 Нагрузка, вызванная стеснённостью температурных деформаций в соединениях с плоскими фланцами [38]:

$$Q_t = \gamma \cdot [2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20)] = 2.628 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.99)$$

5.7.22 Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения [38] (поскольку на фланцевое соединение не действуют внешние изгибающие моменты, принимаем M равным нулю):

$$P_{\Phi 1} = \max \left[\begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right] = 3.478 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.100)$$

5.7.23 Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов [38]:

$$P_{\Phi 2} = \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\Phi} \cdot \sigma_{206}) = 1.6 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.101)$$

5.7.24 Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения [38]:

$$P_{\Phi M} = \max(P_{\Phi 1}, P_{\Phi 2}) = 3.478 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.102)$$

5.7.25 Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений в рабочих условиях [38]:

$$P_{\Phi p} = P_{\Phi M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 2.424 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.103)$$

5.7.26 Расчётное напряжение в болтах [38]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						85
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_{6м}}{A_6} = 127.8 \text{ МПа} \quad (5.104)$$

- при рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_{6р}}{A_6} = 89.064 \text{ МПа} \quad (5.105)$$

5.7.27 Проверка условия прочности болтов при затяжке (5.70) и в рабочих условиях (5.71):

$$\begin{aligned} \sigma_{61} &= 127.81 < 147 = \sigma_{206}, \\ \sigma_{62} &= 89.064 < 143 = \sigma_{д.6} \end{aligned}$$

Поскольку условия (5.70) и (5.71) выполняются, можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции по данному условию прочности.

5.7.28 Удельное давление на прокладку [38]:

$$q = \frac{\max(P_{6м}, P_{6р})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} = 33.934 \text{ МПа} \quad (5.106)$$

5.7.29 Для мягкой прокладки из фторопласта-4 произведём проверку условия прочности (5.72):

$$q = 33.934 < 40 = q_d$$

Условие (5.72) выполняется, в связи с чем можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции по данному условию прочности.

5.7.30 Расчетный изгибающий момент, действующий на плоский фланец при затяжке [38]:

$$M_M = C_F \cdot P_{6м} \cdot b = 1.139 \times 10^8 \text{ Н·мм} \quad (5.107)$$

5.7.31 Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях [38]:

$$M_p = C_F \cdot \max[P_{6р} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] = 1.356 \times 10^8 \text{ Н·мм} \quad (5.108)$$

5.7.32 Расчётные напряжения во фланце при затяжке [38]:

- меридиональное изгибное напряжение в обечайке плоского фланца:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						86
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma_{0M} = \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D_{пр}} = 479.672 \text{ МПа} \quad (5.109)$$

- радиальное напряжение в тарелке плоского фланца в условиях затяжки:

$$\sigma_{RM} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 3.747 \text{ МПа} \quad (5.110)$$

- окружное напряжение в тарелке плоского фланца в условиях затяжки:

$$\sigma_{TM} = \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 104.625 \text{ МПа} \quad (5.111)$$

5.7.33 Расчётные напряжения во фланцах в рабочих условиях [38]:

- меридиональное изгибное напряжение для плоских фланцев:

$$\sigma_{0p} = \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D_{пр}} = 571.019 \text{ МПа} \quad (5.112)$$

- максимальное меридиональное мембранное напряжение в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0mp} = \max \left[\frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)} \right] = 58.404 \text{ МПа} \quad (5.113)$$

5.7.34 Напряжения в тарелке плоского фланца в рабочих условиях [38]:

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 4.46 \text{ МПа} \quad (5.114)$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} = \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 124.55 \text{ МПа} \quad (5.115)$$

5.7.35 Осуществим проверку условия статической прочности фланцев при затяжке (5.73) и рабочих условиях (5.74).

Максимальное напряжение во фланце при рабочих условиях [38]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		87

$$\sigma_{Pmax} = \max \left(\left(\begin{array}{c} |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \end{array} \right) \right) = 637.165 \text{ МПа} \quad (5.116)$$

Максимальное напряжение во фланце при условиях затяжки [38]:

$$\sigma_{3max} = \max(|\sigma_{0m} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0m} + \sigma_{Tm}|) = 584.298 \text{ МПа} \quad (5.117)$$

Осуществляем непосредственную проверку условий:

$$\sigma_{3max} = 584.298 < 1.3 \cdot 3 \cdot 184 = 717.6 = \sigma_{20},$$

$$\sigma_{Pmax} = 637.165 < 1.3 \cdot 3 \cdot 178 = 694.2 = \sigma_{д.ф}$$

Поскольку условия (5.73) и (5.74) выполняются, можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции по данному условию прочности.

5.7.36 Угол поворота плоского фланца [38]:

$$\Theta = M_p \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E} = 0.012^{\circ} \quad (5.118)$$

5.7.37 Осуществим проверку условия прочности по углу поворота фланца (5.75). Учтём при этом, что допускаемый угол поворота фланца по стандарту [38] равен 0.013 градусов.

$$\Theta = 0.012 < 0.013 \cdot 1.3 = 0.017 = \Theta_{д}$$

Поскольку неравенство (5.75) выполняется, делаем вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции по данному условию прочности.

5.7.38 Рассмотрим результаты:

- условие прочности соединения по болтам в условиях затяжки и рабочих условиях – выполняется (пункт 5.7.27);
- условие прочности соединения по прокладке – выполняется (пункт 5.7.29);
- условие статической прочности соединения в условиях затяжки и рабочих условиях – выполняется (пункт 5.7.35);
- условие прочности соединения по углу поворота фланца – выполняется (пункт 5.7.37).

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают полную надёжность конструкции соединения.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

5.8 Расчёт опор аппарата

Названия элементов – опорные лапы аппарата. Номер позиции на расчётной модели – 13.

Расчётная схема крепления опорных лап представлена на рисунке 17.

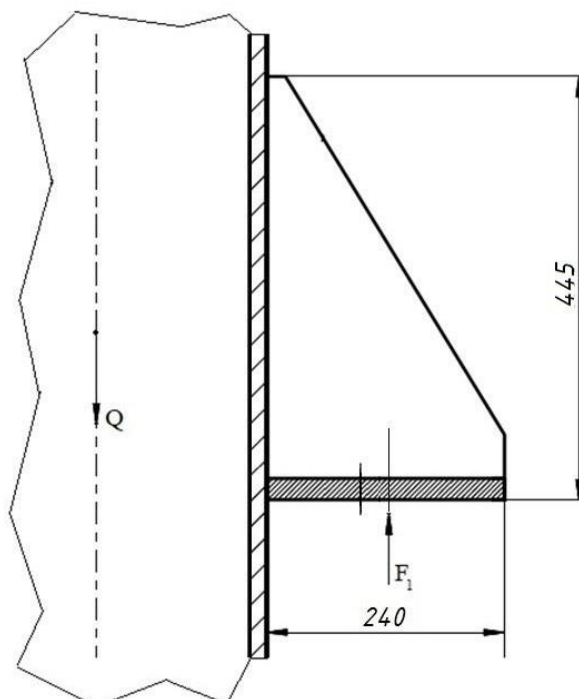


Рисунок 17 – Расчётная схема крепления опорных лап

где Q – нагрузка на опоры со стороны аппарата, кН; F_1 – вертикальное усилие на опорную стойку, кН.

Исходные данные для расчёта:

- масса эллиптической крышки, кг, $m_{э,к} = 237,3$ [35];
- масса днища рубашки, кг, $m_{д,р} = 276,3$ [35];
- длина развёртки цилиндрической обечайки, м, $l_{ц} = 5,655$;
- высота цилиндрической обечайки, м, $H_{ц} = 4,2$ [21];
- толщина стенки цилиндрической обечайки, м, $s_{ц} = 0,008$ (пункт 5.1);
- объём аппарата, m^3 , $V_{кор} = 12,5$ [21];
- плотность материала корпуса, $кг/м^3$, $\rho_{ст} = 7920$ [39];
- диаметр рубашки, мм, $D_p = 1950$;
- длина развёртки обечайки рубашки, м, $l_{цр} = 6,126$;
- высота обечайки рубашки, м, $H_{цр} = 4,05$ [21];

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		89

- толщина стенки рубашки, м, $s_{\text{цр}} = 0,008$ (пункт 5.3);
- плотность материала рубашки, кг/м^3 , $\rho_{\text{ст.р}} = 7830$ [39];
- давление гидроиспытания в рубашке, МПа, $p = 0,2$ (пункт 5.3);
- допускаемое напряжение стали 15ХМ, МПа, $\sigma_{\text{д.руб}} = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);

- масса фланцевого соединения, кг, $m_{\text{ф}} = 697,3$ [37];
- масса привода, кг, $m_{\text{п}} = 538$ [24];
- масса мешалки, кг, $m_{\text{м}} = 5,11$ [24].

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции опор. Условием прочности является следующее условие:

$$F_1 \leq F_{1,\text{д}} \quad (5.119)$$

где F_1 – сила, с которой опора действует на подкладной лист и обечайку рубашки аппарата, Н; $F_{1,\text{д}}$ – допускаемая сила, с которой на обечайку может действовать опора, Н [40].

Все необходимые для проверки данного условия расчёты осуществляются в соответствии с источниками [24, 40].

5.8.1 Предварительно необходимо рассчитать максимальный вес аппарата, соответствующий условиям гидроиспытаний, когда аппарат и рубашка целиком заполнены водой.

Вес крышки:

$$G_{\text{э.к.1}} = g \cdot m_{\text{э.к.}} = 2,328 \times 10^3 \text{ Н} \quad (5.120)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Поскольку крышка идентична днищу, удваиваем данный вес:

$$G_{\text{э}} = G_{\text{э.к.1}} \cdot 2 = 4,656 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.8.2 Объём материала цилиндрической обечайки:

$$V_{\text{ц}} = l_{\text{ц}} \cdot H_{\text{ц}} \cdot s_{\text{ц}} = 0,19 \text{ м}^3 \quad (5.121)$$

5.8.3 Масса обечайки:

$$m_{\text{ц}} = V_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{ст}} = 1,505 \times 10^3 \text{ кг} \quad (5.122)$$

5.8.4 Вес обечайки:

$$G_{\text{ц}} = m_{\text{ц}} \cdot g = 1,476 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.123)$$

5.8.5 Объём обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.121):

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$V_{\text{цр}} = l_{\text{цр}} \cdot H_{\text{цр}} \cdot s_{\text{цр}} = 0.198 \text{ м}^3$$

5.8.6 Масса обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.122):

$$m_{\text{цр}} = V_{\text{цр}} \cdot \rho_{\text{ст.р}} = 1.558 \times 10^3 \text{ кг}$$

5.8.7 Вес обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.123):

$$G_{\text{цр}} = m_{\text{цр}} \cdot g = 1.528 \times 10^4 \text{ Н}$$

5.8.8 Вес днища рубашки по аналогии с формулой (5.120):

$$G_{\text{др}} = g \cdot m_{\text{др}} = 2.711 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.8.9 Вес фланцевого соединения по аналогии с формулой (5.120):

$$G_{\text{ф}} = m_{\text{ф}} \cdot g = 6.841 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.8.10 Вес привода и мешалки по аналогии с формулой (5.120):

$$G_{\text{п}} = (m_{\text{п}} + 2m_{\text{м}}) \cdot g = 5.378 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.8.11 Вес штуцеров и других вспомогательных устройств принимаем по [27] равным 10% от веса аппарата без учёта веса привода:

$$G_{\text{пр}} = 0.1 \cdot [G_{\text{ф}} + G_{\text{др}} + G_{\text{цр}} + G_{\text{ц}} + (G_{\text{э}})] = 4.425 \times 10^3 \text{ Н} \quad (5.124)$$

5.8.12 Общий вес пустого аппарата:

$$G_{\text{ап}} = G_{\text{пр}} + G_{\text{ф}} + G_{\text{др}} + G_{\text{цр}} + G_{\text{ц}} + (G_{\text{э}}) + G_{\text{п}} = 5.406 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.125)$$

5.8.13 Объём воды в рубашке:

$$V_{\text{руб}} = (V_1 - V_2) + (V_3 - V_4) \quad (5.126)$$

где V_1 – объём цилиндрической обечайки рубашки, м^3 ; V_2 – объём цилиндрической обечайки корпуса, м^3 ; V_3 – объём эллиптического днища рубашки, м^3 ; V_4 – объём эллиптического днища корпуса, м^3 .

Объёмы цилиндрических сегментов, согласно [21], равны 11,90 и 10,629 м^3 соответственно. Объёмы эллиптических сегментов, согласно [35], равны 1,07 и 0,862 м^3 соответственно. Тогда:

$$V_{\text{руб}} = (11.90 - 10.629) + (1.07 - 0.862) = 1.479 \text{ м}^3$$

5.8.14 Объём воды в аппарате при гидравлическом испытании:

$$V_{\text{воды}} = V_{\text{руб}} + V_{\text{кор}} = 13.979 \text{ м}^3 \quad (5.127)$$

5.8.15 Вес воды в аппарате по аналогии с формулой (5.125):

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		91

$$G_{\text{воды}} = 13.979 \cdot 1 \times 10^3 \cdot 9.81 = 1.371 \times 10^5 \text{ Н}$$

5.8.16 Вес аппарат при гидравлическом испытании:

$$G_{\text{п.ап}} = G_{\text{ап}} + G_{\text{воды}} = 1.912 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.128)$$

5.8.17 Расположим аппарат в помещении подвешенным между этажами. Для этого в качестве опор можно использовать лапы. Примем количество лап равным четырём. Тогда на одну лапу придётся веса:

$$F_1 := \frac{G_{\text{п.ап}}}{4} = \frac{191191.85}{4} = 47797.963 \text{ Н} \quad (5.129)$$

В соответствии со стандартом [41] принимаем в качестве опорных устройств штампованные опорные лапы с допускаемой нагрузкой на одну лапу, равной 63000 Н. Параметры опоры следующие [41]:

- расстояние между средними линиями рёбер опоры, мм, $g = 215$;
- высота опорной лапы, мм, $h_1 = 445$;
- ширина основной плиты опорной лапы, мм, $b_4 = 225$;
- длина подкладного листа, мм, $b_3 = 600$;
- ширина подкладного листа, мм, $b_2 = 360$;
- толщина подкладного листа, мм, $s_2 = 8$;
- длина опорной лапы, мм, $l_1 = 240$.

5.8.18 Осуществим проверку применимости расчётных формул [40]:

$$\frac{(s_{\text{цп}} - c)}{D_p} = 3.077 \times 10^{-3} \leq 0.05, \quad (5.130)$$

$$g = 215 \text{ мм} \geq 0.2 \cdot h_1 = 89 \text{ мм}, \quad (5.131)$$

$$0.04 \leq \frac{h_1}{D_p} = 0.228 \leq 0.5, \quad (5.132)$$

$$0.04 \leq \frac{b_4}{D_p} = 0.115 \leq 0.5, (5.133)$$

$$0.04 \leq \frac{b_3}{D_p} = 0.308 \leq 0.8, (5.134)$$

$$b_2 = 360 \geq 0.6 \cdot b_3 = 360, (5.135)$$

$$b_3 = 600 \leq 1.5 \cdot h_1 = 667.5, (5.136)$$

$$s_2 = 8 \geq s = 1s (5.137)$$

Поскольку все условия выполняются, формулы стандарта применимы для необходимого нам расчёта.

5.8.19 Расстояние между точкой приложения усилия и подкладным листом [30]:

$$e_1 = \frac{5}{6} \cdot l_1 = \frac{5}{6} \cdot 240 = 200 \text{ мм} (5.138)$$

5.8.20 Допускаемое усилие, с которым опора воздействует на обечайку:

$$F_1 \leq F_{1.д} = \frac{\sigma_{i.д} \cdot b_3 \cdot (s_{цп} - c)^2}{K_8 \cdot (e_1 + s_2)} (5.139)$$

где $\sigma_{i.д}$ – предельное напряжение изгиба, МПа; K_8 – коэффициент, учитывающий конструкцию опор [40].

5.8.21 Предельное напряжение изгиба:

$$\sigma_{i.д} = K_1 \cdot K_2 \cdot \sigma_{д.руб} (5.140)$$

где K_1 и K_2 – вспомогательные коэффициенты [40].

K_2 для условий гидроиспытания принимаем равным 1,05. K_1 рассчитывается по формуле:

$$K_1 = \frac{1 - v_2^2}{\left(\frac{1}{3} + v_1 \cdot v_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_1 \cdot v_2\right)^2 + (1 - v_2^2) \cdot v_1^2}} (5.141)$$

где v_1 – коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба; v_2 – коэффициент, учитывающий степень нагрузки общими мембранными напряжениями [40].

5.8.22 Для определения упомянутых в предыдущем пункте коэффициентов произведём расчёт следующих вспомогательных параметров [40]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		93

- общие мембранные напряжения:

$$\sigma'_m := \frac{p \cdot D_p}{2 \cdot (s_{\text{цр}} - c)} = \frac{0.2 \cdot 1.95 \times 10^3}{2 \cdot (8 - 2)} = 32.5 \text{ МПа} \quad (5.142)$$

- расстояние между опорным узлом и ближайшим сварным швом более:

$$\sqrt{D_p \cdot s_{\text{цр}}} = 124.9 \text{ мм} \quad (5.143)$$

а потому позволительно принять коэффициент прочности сварных швов φ , расположенных в области опорного узла, равным 1.

5.8.23 По рекомендации стандарта [40] принимаем v_1 равным 0,4. В то же время коэффициент v_2 [40]:

$$v_2 = \frac{\sigma'_m}{K_2 \cdot \sigma_{\text{д.руб}} \cdot \varphi} = 0.168 \quad (5.144)$$

Таким образом, K_1 по формуле (5.141):

$$K_1 = \frac{1 - v_2^2}{\left(\frac{1}{3} + v_1 \cdot v_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_1 \cdot v_2\right)^2 + (1 - v_2^2) \cdot v_1^2}} = 1.01$$

Отсюда, по формуле (5.140):

$$\sigma_{\text{и.д}} = 1.01 \cdot 1.25 \cdot 155 = 195.649 \text{ МПа}$$

5.8.24 Для определения коэффициента K_8 предварительно определяются следующие вспомогательные параметры [40]:

$$x = \ln \left[\frac{D_p}{2 \cdot (s_{\text{цр}} - c)} \right] = 5.091 \text{ мм}, \quad (5.145)$$

$$y = \ln \left(\frac{h_1}{D_p} \right) = -1.478, \quad (5.146)$$

$$y_1 = \ln \left(\frac{b_3}{D_p} \right) = -1.179 \quad (5.147)$$

5.8.25 Коэффициент K_8 [40]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		94

$$K_8 = \min \left\{ \begin{array}{l} \exp[(-49,919 - 39,119x - 107,01y_1 - 1,693x^2 - 11,920xy_1 - 39,276y_1^2 + \\ + 0,237x^3 + 1,608x^2y_1 + 2,761xy_1^2 - 3,854y_1^3)10^{-2}] \\ \exp[(-5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - 7,286xy - 2,042y^2 + \\ + 0,1322x^3 + 0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3)10^{-2}] \end{array} \right\} = 0.242$$

5.8.26 Тогда по формуле (5.139):

$$F_{1,д} = \frac{195.649 \cdot 600 \cdot (8 - 2)^2}{0.242 \cdot (200 + 8)} = 8.394 \times 10^4 \text{ Н}$$

5.8.27 Проверим выполнение условия прочности обечайки от воздействия опор (5.119):

$$F_1 = 4.78 \times 10^4 \text{ Н} \leq F_{1,д} = 8.394 \times 10^4 \text{ Н}$$

Условие выполняется. Можно сделать вывод, что при принятых опорных лапах надёжность конструкции обеспечена.

5.9 Расчёт вала для перемешивающего устройства реактора синтеза полипропилена

Название элемента – гладкий однопролётный вал аппарата. Номер позиции на расчётной модели – 14.

Схема для расчёта вала представлена на рисунке 18:

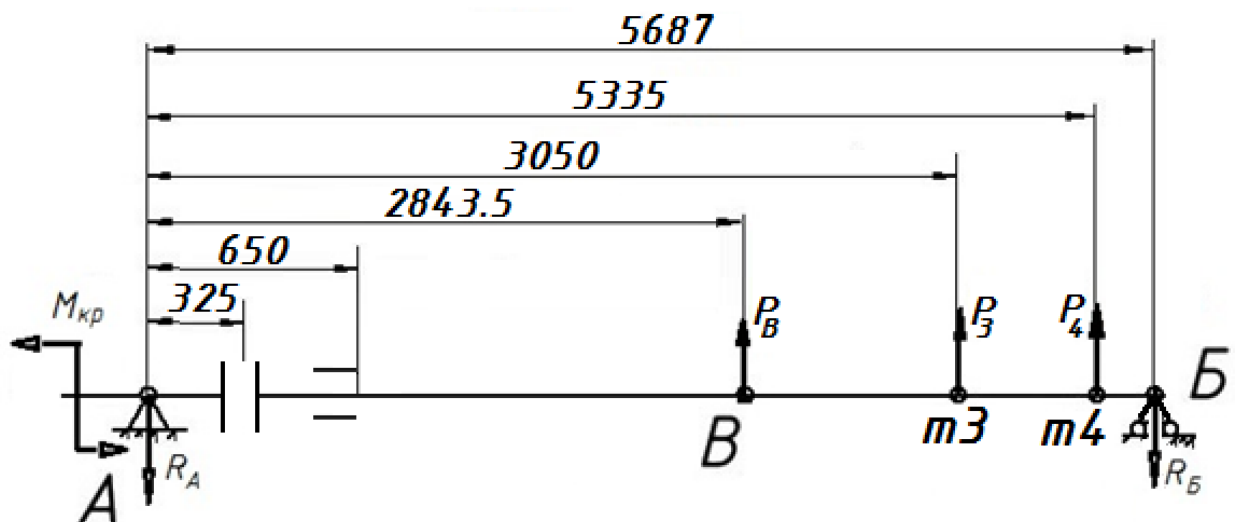


Рисунок 18 – Расчётная схема гладкого однопролётного вала

Исходные данные для расчёта (в соответствии с пособием [24]):

- длина вала, мм, $L = 5687$;
- координата центра тяжести муфты, мм, $l_1 = 325$;
- координата центра тяжести уплотнения, мм, $l_2 = 520$;
- координата центра тяжести верхней мешалки, мм, $l_3 = 3050$;
- координата центра тяжести нижней мешалки, мм, $l_4 = 5335$;
- масса муфты, кг, $m_1 = 36$ [42];
- масса уплотнения, кг, $m_2 = 58$ [42];
- масса мешалок, кг, $m_3, m_4 = 5.11$ [24];
- модуль предельной упругости материала вала, Па, $E_v = 2 \cdot 10^{11}$ [39];
- плотность материала вала, кг/м³, $\rho_v = 7920$ [39];
- плотность перемешиваемой среды, кг/м³, $\rho_{cp} = 776,47$ (пункт 5.2);
- диаметр аппарата, мм, $D = 1800$;
- диаметр мешалки, мм, $d_m = 560$ (пункт 3.2);
- число мешалок на валу, шт, $n_m = 2$ (пункт 3.2);
- мощность привода, кВт, $N_{пр} = 1.5$ (пункт 3.2);
- площадь лобового сопротивления внутреннего устройства, м², $F = 2.4$.

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции вала по критериям виброустойчивости, жёсткости и прочности. Неравенства, выражающие эти критерии, имеют следующий вид:

$$\frac{\omega}{\omega_{0к}} \leq 0.7 \quad (5.148)$$

где ω – угловая скорость, с⁻¹; $\omega_{0к}$ – критическая угловая скорость, с⁻¹ [43, 44].

$$A_{zj} \leq A_{zj,д} \quad (5.149)$$

где A_{zj} – динамическое смещение оси вращения вала вследствие зазоров опор в опасном по жёсткости сечении, м; $A_{zj,д}$ – допускаемое смещение оси вращения вала в опасном по жёсткости сечении, м [19, 43].

$$\sigma_{экр} \leq \sigma_d \quad (5.150)$$

где $\sigma_{экр}$ – эквивалентное напряжение в опасном по прочности сечении, МПа; σ_d – допускаемое напряжение в опасном по прочности сечении, МПа [19, 43].

5.9.1 Критическая угловая скорость однопролётного вала:

$$\omega_{0к} = \left(\frac{\alpha_1}{L} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{(E \cdot J)}{m_i}} \quad (5.151)$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						96
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где α_1 – первый корень частного уравнения; L – длина пролёта, м; J – момент инерции поперечного сечения вала, м^4 ; E – модуль упругости материала вала, Па; m_i – масса единицы длины вала, кг [44].

5.9.2 Относительная приведённая масса деталей на однопролётном валу:

$$m_{\text{пр.отн}} = \frac{m_{\text{сум.пр}}}{m_L \cdot L} \quad (5.152)$$

где $m_{\text{сум.пр}}$ – суммарная приведённая масса деталей на валу, кг; m_L – линейная масса вала, кг/м [44].

5.9.3 Линейная масса вала [44]:

$$m_L = \pi \cdot \frac{d_B^2}{4} \cdot \rho_B \quad (5.153)$$

Тогда:

$$m_L = \pi \cdot \left[\frac{\left(\frac{65}{1000} \right)^2}{4} \right] \cdot 7920 = 26.28 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

5.9.4 Суммарная масса деталей, закреплённых на однопролётном валу:

$$m_{\text{сум.пр}} = \sum_{i=1}^{n_j} m_{i,\text{пр}} \quad (5.154)$$

где n_j – число деталей в пролёте; $m_{i,\text{пр}}$ – приведенная масса каждой i -й детали в пролёте, кг [44].

В пролёте закреплены: муфта, торцевое уплотнение и две мешалки. Произведём следующие действия:

- поместим муфту посередине между первой опорой и внешней стороной аппарата. Её фактическая координата l_1 будет равна 325 мм;
- для размещения торцевого уплотнения необходимо из расстояния от первой опоры до аппарата, равного 650 мм, вычесть половину высоты уплотнения, равного 260 мм. Таким образом, фактическая координата уплотнения l_2 будет равна 520 мм;
- размещение первой мешалки принимаем конструктивно равным 2400 мм от крышки аппарата. С учётом расстояния в 650 мм от крышки аппарата до верхней опоры первая мешалка будет иметь фактическую координату l_3 , равную 3050 мм;
- для определения координаты второй мешалки из общей высоты аппарата, равной 5180 мм, необходимо вычесть расстояние от мешалки до днища, равное 450 мм, и половину длины ступицы мешалки, равную 45 мм. С учётом расстояния в 650 мм от крышки

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

аппарата до верхней опоры вторая мешалка будет иметь фактическую координату l_4 , равную 5335 мм.

5.9.5 Относительная координата детали в пролёте [44]:

$$l_{i.\text{отн}} = \frac{l_i}{L} \quad (5.155)$$

где l_i – фактическая координата i -ой детали в пролёте, мм.

Таким образом:

$$l_{1.\text{отн}} = \frac{l_1}{L} = 0.057$$

$$l_{2.\text{отн}} = \frac{l_2}{L} = 0.091$$

$$l_{3.\text{отн}} = \frac{l_3}{L} = 0.536$$

$$l_{4.\text{отн}} = \frac{l_4}{L} = 0.938$$

5.9.6 Приведённая масса детали в пролёте [44]:

$$m_{i.\text{пр}} = m_i \cdot y_{ii}^2 \quad (5.156)$$

где m_i – фактическая масса i -ой детали в пролёте, кг, y_{ii} – безразмерный динамический прогиб вала от воздействия i -ой детали в пролёте.

Безразмерные прогибы вала для муфты, уплотнения и мешалок определяются по рисунку 19 [19].

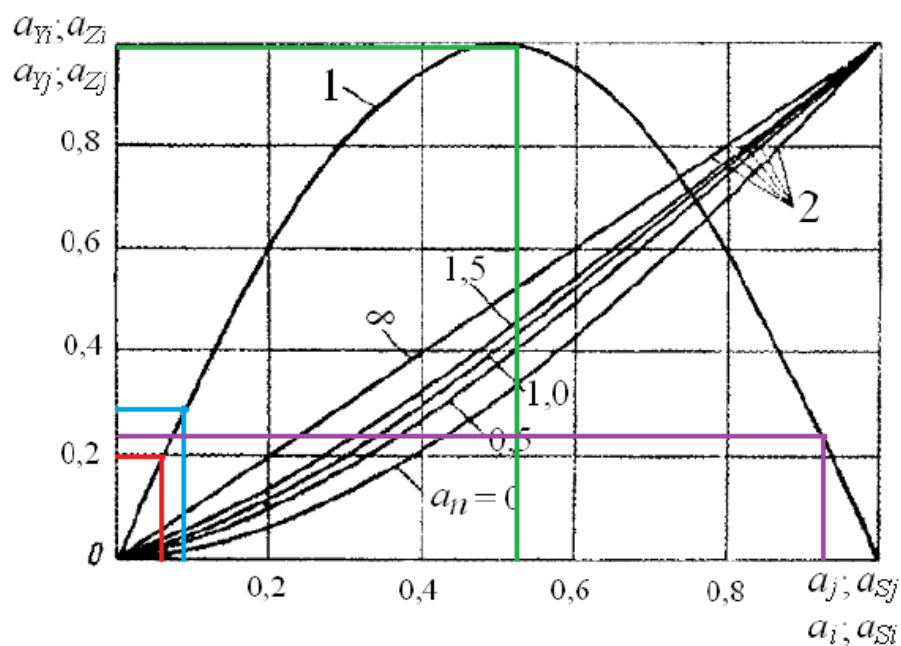


Рисунок 19 – Безразмерные динамические прогибы: 1 – для однопролётного вала, 2 – для консольных валов [19].

Таким образом, безразмерные динамические прогибы $y_{1.1}$, $y_{1.2}$, $y_{1.3}$ и $y_{1.4}$ равны 0.2, 0.3, 0.99 и 0.24 соответственно.

Массы муфты, уплотнения и мешалок берём по [42], а именно масса муфты m_1 , уплотнения m_2 и мешалок m_3 и m_4 равны соответственно 36, 58, 5.11 и 5.11 кг.

5.9.7 Приведённая масса деталей на валу по формуле (5.154):

$$m_{\text{сум.пр}} = m_1 \cdot y_{1.1}^2 + m_2 \cdot y_{1.2}^2 + m_3 \cdot y_{1.3}^2 + m_4 \cdot y_{1.4}^2 = 11.963 \text{ кг}$$

5.9.8 Расчётный диаметр вала [44]:

$$d_p \geq \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}} \quad (5.157)$$

где A_1 и A_2 – члены уравнения, рассчитываемые по следующим формулам [44]:

$$A_1 = q \cdot f \cdot L^2 \quad (5.158)$$

$$A_2 = \frac{8 \cdot m_{\text{сум.пр}} \cdot f \cdot L}{\pi \cdot \rho_B} \quad (5.159)$$

где q – коэффициент приведения однопролётного вала, равный 0.5 [44]; f – безразмерный коэффициент; ρ_B – плотность материала вала, кг/м^3 .

5.9.9 Безразмерный коэффициент [44]:

$$f = \frac{8 \cdot \rho_B \cdot \omega^2 \cdot L^2}{\xi^2 \cdot \eta \cdot E} \quad (5.160)$$

где ω – угловая скорость вращения вала, с^{-1} ; ξ – коэффициент из условия виброустойчивости для жёсткого вала, работающего в системе жидкость-жидкость (равный 0.7 [14]); η – коэффициент, учитывающий условия закрепления вала (равный 48 [44]); E – модуль упругости материала вала, Па.

Произведём дополнительные расчёты:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = 18.85 \text{ с}^{-1} \quad (5.161)$$

Тогда:

$$f = \frac{8 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot \omega^2 \cdot L^2}{\xi^2 \cdot \eta \cdot E_{\text{в}}} = 1.54 \times 10^{-4}$$

5.9.10 Таким образом, по формулам (5.158) и (5.159):

$$A_1 = q \cdot f \cdot L^2 = 2.49 \times 10^{-3},$$

$$A_2 = \frac{8 \cdot m_{\text{сум.пр}} \cdot f \cdot L}{\pi \cdot \rho_{\text{в}}} = 3.368 \times 10^{-6}$$

Отсюда по формуле (5.157):

$$d_p = \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}} = 0.065 \text{ м}$$

5.9.11 Момент инерции сечения вала [44]:

$$J = \frac{\pi \cdot d_p^4}{64} = 8.762 \times 10^{-7} \text{ м}^4 \quad (5.162)$$

5.9.12 Относительная приведённая масса вала [44]:

$$m_{\text{пр.отн}} = \frac{m_{\text{сум.пр}}}{m_L \cdot L} = 0.08 \quad (5.163)$$

5.9.13 Первый корень частотного уравнения α_1 определяется по аппроксимирующей формуле [19]:

$$\alpha_1 = 3.146 - 1.3426 \cdot m_{\text{пр.отн}} + 0.836 \cdot m_{\text{пр.отн}}^2 -$$

$$- 0.34086 \cdot m_{\text{пр.отн}}^3 + 0.0638 \cdot m_{\text{пр.отн}}^4 = 3.544 \quad (5.164)$$

5.9.14 Критическая угловая скорость по формуле (5.151):

$$\omega_{0\text{к}} = \left(\frac{\alpha_1}{L} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{(E_{\text{в}} \cdot J)}{m_L}} = 31.712 \text{ с}^{-1}$$

5.9.15 Осуществим проверку условия прочности вала по виброустойчивости:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		100

$$\frac{\omega}{\omega_{0к}} = \frac{18.8}{31.7} = 0.593 < 0.7$$

Неравенство выполняется. В связи с этим можно утверждать, что надёжность конструкции по виброустойчивости обеспечена.

5.9.16 Эксцентриситет массы мешалки [34]:

$$e_m = \frac{10^{-3}}{\sqrt{\omega}} = 2.306 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.165)$$

5.9.17 Приведённые эксцентриситеты масс мешалок [34]:

$$e_{м.пр.3} = \frac{e_m}{y_{1.3}} = 2.33 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.166)$$

$$e_{м.пр.4} = \frac{e_m}{y_{1.4}} = 9.61 \times 10^{-4} \text{ м}$$

5.9.18 Приведённая масса вала [34]:

$$m_{в.пр} = q \cdot (m_L \cdot L) = 74.73 \text{ кг} \quad (5.167)$$

5.9.19 Смещение оси вала за счёт зазоров в опорах [34]:

$$\Delta_{z,j} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot l_j}{L} + \Delta_A \quad (5.168)$$

где Δ_A и Δ_B – радиальные зазоры в подшипниках, принимаемые для диаметра вала 65 мм равными $30 \cdot 10^{-6}$ м [34].

Тогда для мест крепления торцевого уплотнения и мешалок:

$$\Delta_{z,2} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot l_2}{L} + \Delta_A = 3 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\Delta_{z,3} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot l_3}{L} + \Delta_A = 3 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\Delta_{z,4} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot l_4}{L} + \Delta_A = 3 \times 10^{-5} \text{ м}$$

5.9.20 Смещение оси вращения за счёт начальной изогнутости вала [34]:

$$\epsilon_z = \epsilon_B \cdot y_k \quad (5.169)$$

где ϵ_B – начальная изогнутость вала в точке приведения, м.

Поскольку отношение длины вала к его диаметру составляет:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

$$\frac{L}{d_B} = 87.492$$

примем по пособию [34] значение начальной изогнутости равным $0.06 \cdot 10^{-3}$ м.

Тогда для торцевого уплотнения и мешалок:

$$\epsilon_{z.2} = \epsilon_B \cdot y_{1.2} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\epsilon_{z.3} = \epsilon_B \cdot y_{1.3} = 5.94 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\epsilon_{z.4} = \epsilon_B \cdot y_{1.4} = 1.44 \times 10^{-5} \text{ м}$$

5.9.21 Смещение оси однопролётного вала в точке приведения [34]:

$$\Delta_B = \frac{(\Delta_A + \Delta_B)}{2} = 3 \times 10^{-5} \text{ м} \quad (5.170)$$

5.9.22 Приведённый эксцентриситет массы однопролётного вала с трёхлопастной мешалкой [34]:

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{\text{пр.}i} \cdot e_{\text{пр.}i})}{m_{\text{сум.пр}} + m_{\text{в.пр}}} + \Delta_B + \epsilon_B \quad (5.171)$$

где $m_{\text{пр.}i}$ – приведенная масса элемента, кг; $e_{\text{пр.}i}$ – эксцентриситет элемента, м; $m_{\text{сумм.пр}}$ – приведенная масса элементов на валу, кг; $m_{\text{в.пр}}$ – приведенная масса вала, кг.

5.9.23 Приведённая масса мешалки [34]:

$$m_{\text{пр.3}} = m_3 \cdot y_{1.3}^2 = 5.008 \text{ кг}$$

Тогда по формуле (5.171):

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр.3}} \cdot e_{\text{м.пр.3}} + m_{\text{пр.4}} \cdot e_{\text{м.пр.4}}}{m_{\text{сум.пр}} + m_{\text{в.пр}}} + \Delta_B + \epsilon_B = 1.067 \times 10^{-4} \text{ м}$$

поскольку в аппарате установлены две мешалки.

5.9.24 Динамический прогиб вала в точке приведения В [34]:

$$y_B = \frac{\epsilon_{\text{пр}}}{\frac{\omega_{0\text{к}}}{\omega} - 1} = 1.554 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.172)$$

5.9.25 Динамическое смещение центра тяжести вала в местах крепления торцевого уплотнения, мешалок и точке приведения В [34]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		102

$$A_{z.yn} = y_B \cdot y_{1.2} + \Delta_{z.2} + \varepsilon_{z.2} = 9.462 \times 10^{-5} \text{ м. (5.173)}$$

$$A_{z.m.3} = y_B \cdot y_{1.3} + \Delta_{z.3} + \varepsilon_{z.3} + \varepsilon_{m.pr.3} = 4.762 \times 10^{-4} \text{ м. (5.174)}$$

$$A_{z.m.4} = y_B \cdot y_{1.4} + \Delta_{z.4} + \varepsilon_{z.4} + \varepsilon_{m.pr.4} = 1.043 \times 10^{-3} \text{ м. (5.175)}$$

$$A_B = y_B + \varepsilon_B + \Delta_B = 2.454 \times 10^{-4} \text{ м (5.176)}$$

5.9.26 Поскольку в аппарате расположены дополнительные внутренние устройства, а именно отражающие перегородки, необходимо произвести расчёты, учитывающие воздействие поперечной гидродинамической силы на вал аппарата.

Критерий мощности для аппарата с внутренними устройствами K_N был рассчитан в рамках гидродинамического расчёта и равен 0,52.

Критерий мощности для аппарата с перегородками и трёхлопастными мешалками K_{NP} принимается по [19] равным 3.4.

5.9.27 Коэффициент сопротивления мешалки [19]:

$$\xi_m = \frac{K_{NP}}{0.7} = 4.857 \text{ (5.177)}$$

5.9.28 Безразмерный комплекс, характеризующий гидродинамический режим потока в аппарате [19]:

$$\Phi = \frac{0.36 \cdot \Gamma_D}{\xi_m \cdot n_m \cdot Re_{\text{ц}}^{0.25}} = 3.903 \times 10^{-3} \text{ (5.178)}$$

где Γ_D – отношение диаметров аппарата и мешалки, n_m – число мешалок, $Re_{\text{ц}}$ – критерий Рейнольдса.

5.9.29 Гидродинамический параметр ψ_0 определяется по аппроксимирующей формуле при $x = \lg(\Phi)$ [19]:

$$\psi_0 = 1.913 + 0.440 \cdot x - 0.456 \cdot x^2 - 0.0971 \cdot x^3 + 0.00125 \cdot x^4 = -0.393 \text{ (5.179)}$$

5.9.30 При площади лобового сопротивления F , равной $2,4 \text{ м}^2$, имеем значение коэффициента лобового сопротивления [19]:

$$c_F = \frac{2.5 \cdot F}{D^2} = 1.852 \text{ (5.180)}$$

5.9.31 Поправочный коэффициент α_F [19]:

$$\alpha_F = 1.999 + 3.748 \cdot c_F - 6.191 \cdot c_F^2 + 5.219 c_F^3 - 1.777 \cdot c_F^4 = -0.046 \text{ (5.181)}$$

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		103

5.9.32 Коэффициент увеличения мощности [19]:

$$c_N = \alpha_F \cdot \left(\frac{K_{NП}}{K_N - 1} \right) + 1 = 1.324 \quad (5.182)$$

5.9.33 По таблице из [19] выбираем аппроксимирующие коэффициенты ближайшего c_N . Коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 равны соответственно 0.216, 0.1918 и 0.04028.

Относительное смещение центра эпюры окружной скорости от оси мешалки [19]:

$$S_V = c_0 + c_1 \cdot \psi_0 + c_2 \cdot \psi_0 = 0.125 \quad (5.183)$$

5.9.34 По таблице из [19] выбираем аппроксимирующие коэффициенты ближайшего S_V . Коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 равны соответственно 0.0048, -0.0168 и -0.0023.

Безразмерная поперечная гидродинамическая сила [19]:

$$\psi_Q = c_0 + c_1 \cdot \psi_0 + c_2 \cdot \psi_0 = 0.012 \quad (5.184)$$

5.9.35 Поперечная гидродинамическая сила, действующая на мешалку [19]:

$$Q_i = 0.015 \cdot k_Q \cdot \psi_Q \cdot \xi_M \cdot \rho_{ср} \cdot \omega^2 \cdot d_M^4 \quad (5.185)$$

где k_Q – коэффициент, учитывающий тип мешалки, равный для трёхлопастной мешалки 0.96; $\rho_{ср}$ – плотность среды в аппарате, кг/м³; d_M – диаметр мешалки, м.

Тогда:

$$Q_i = 0.015 \cdot k_Q \cdot \psi_Q \cdot \xi_M \cdot \rho_{ср} \cdot \omega^2 \cdot d_M^4 = 23.242 \text{ Н}$$

5.9.36 Приведённая гидродинамическая сила [19]:

$$Q_{iB} = Q_i \cdot y_{ii} \quad (5.186)$$

Тогда:

$$Q_{3B} = Q_i \cdot y_{13} = 23.01 \text{ Н},$$

$$Q_{4B} = Q_i \cdot y_{14} = 5.578 \text{ Н}$$

5.9.37 Суммарная приведённая гидродинамическая сила [19]:

$$Q_B = Q_{3B} + Q_{4B} = 28.588 \text{ Н} \quad (5.187)$$

5.9.38 Динамический прогиб вала в точке приведения В от Q_B [19]:

$$y_{BQ} = \frac{Q_B \cdot L^3}{48 \cdot E_B \cdot J} = 6.251 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.188)$$

5.9.39 Динамические смещения центра тяжести вала в местах крепления мешалок,

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						104
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

уплотнения и в точке приведения с учётом поперечной гидродинамической силы:

$$A_{Q3} = A_{z.m.3} + y_{BQ} \cdot y_{1.3} = 1.095 \times 10^{-3} \text{ м}, \quad (5.189)$$

$$A_{Q4} = A_{z.m.4} + y_{BQ} \cdot y_{1.4} = 1.193 \times 10^{-3} \text{ м},$$

$$A_{Q.уп} = A_{z.уп} + y_{BQ} \cdot y_{1.2} = 1.821 \times 10^{-4} \text{ м},$$

$$A_{BQ} = A_B + y_{BQ} = 8.705 \times 10^{-4} \text{ м}$$

5.9.40 В соответствии с рекомендациями пособия [34] опасным по жёсткости сечением признаётся торцевое уплотнение, для которого допускаемое значение динамического смещения центра тяжести вала составляет $0.25 \times 10^{-3} \text{ м}$.

Осуществим проверку условия прочности вала по критерию жёсткости:

$$A_{Q.уп} = 1.821 \times 10^{-4} \text{ м} < A_{z.уп.д} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ м}$$

Неравенство выполняется. Таким образом, можно сделать вывод, что надёжность конструкции вала по жёсткости обеспечена.

5.9.41 Сосредоточенная сила, действующая на мешалку [19]:

$$P_i = Q_i + m_i \cdot \omega^2 \cdot A_{z.i} \quad (5.190)$$

где Q_i – поперечная гидродинамическая сила, воздействующая на мешалку, Н; m_i – масса мешалки, кг; ω – угловая скорость вращения мешалки, с^{-1} ; $A_{z.i}$ – динамическое смещение оси вала от вращения мешалки, м.

Формула выглядит подобным образом, поскольку в аппарате размещены дополнительные внутренние устройства, а именно – отражательные перегородки. Тогда:

$$P_3 = Q_i + m_3 \cdot \omega^2 \cdot A_{z.m.3} = 24.102 \text{ Н},$$

$$P_4 = Q_i + m_4 \cdot \omega^2 \cdot A_{z.m.4} = 25.125 \text{ Н}$$

5.9.42 Приведённая центробежная сила, действующая на вал в точке приведения В, рассчитывается по аналогии с предыдущей формулой [19]:

$$P_B = m_{в.пр} \cdot \omega^2 \cdot A_{BQ} = 22.991 \text{ Н}$$

5.9.43 В соответствии с рисунком, расположенным в начале подраздела, построим формулы реакций опор А и Б и найдём их значения:

$$R_A = \frac{P_B \cdot \frac{L}{2} + P_3 \cdot (L - l_3) + P_4 \cdot (L - l_4)}{L} = 24.227 \text{ Н}, (5.191)$$

$$R_B = \frac{P_B \cdot \frac{L}{2} + P_3 \cdot l_3 + P_4 \cdot l_4}{L} = 47.992 \text{ Н} (5.192)$$

5.9.44 Воспользовавшись программами ЭВМ, предназначенными для построения эпюр поперечных сил и изгибающих моментов, действующих на балку [45], получим эпюры, отражённые на рисунке 20.

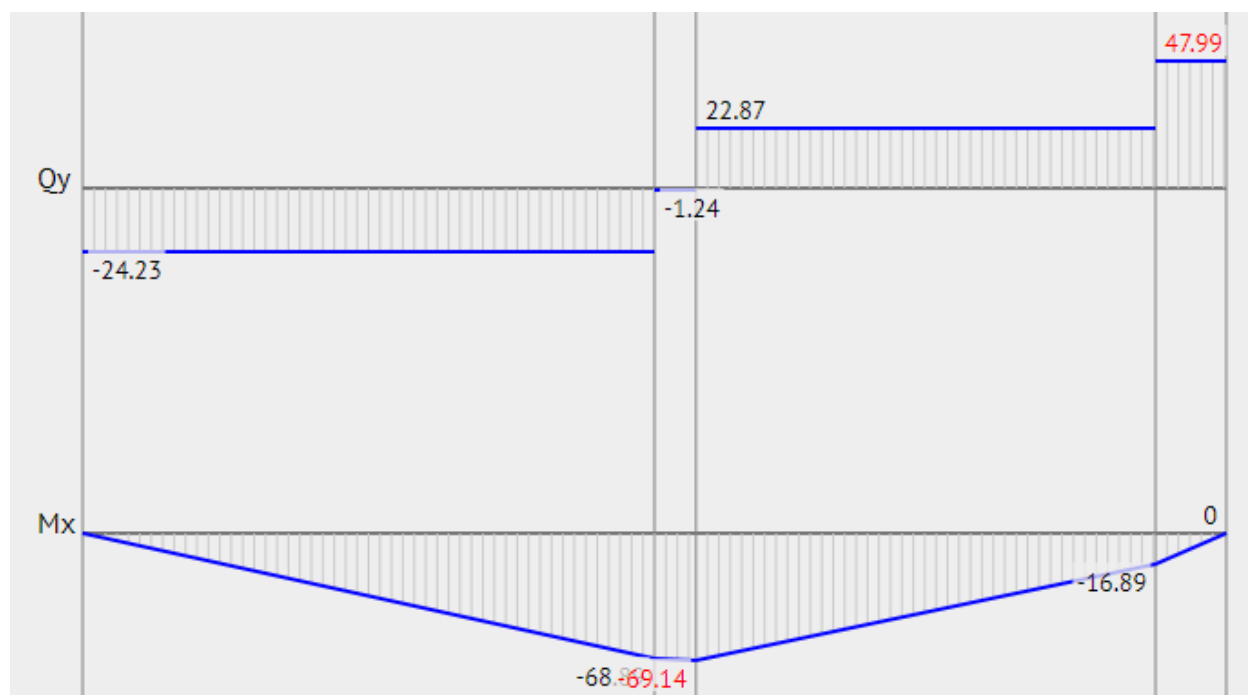


Рисунок 20 – Эпюры поперечных сил и изгибающих моментов на однопролётном валу

Из рисунка 20 видно, что наиболее опасным по прочности сечением является точка крепления верхней мешалки, в которой действует изгибающий момент $M_{и}$, равный 69,14 Н*м.

5.9.45 Крутящий момент, передаваемый выходным валом [34]:

$$M_K = \frac{N_{пр} \cdot 1000}{\omega} = 79.787 \text{ Н·м} (5.193)$$

где $N_{пр}$ – мощность привода, кВт.

5.9.46 Момент сопротивления вала в опасном по прочности сечении [34]:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		106

$$W_z = \frac{\pi \cdot d_p^3}{32} = 2.696 \times 10^{-5} \text{ Н·м} \quad (5.194)$$

5.9.47 Эквивалентное напряжение в опасном сечении [34]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{\sqrt{M_{\text{и}}^2 + M_{\text{к}}^2}}{W_z \cdot 10^6} = 3.916 \text{ МПа} \quad (5.194)$$

где $M_{\text{и}}$ – изгибающий момент в опасном сечении, Н*м.

5.9.48 Допускаемое напряжение в опасном сечении [34]:

$$\sigma_{\text{д}} = \frac{\varepsilon_M \cdot \sigma_1}{K_{\sigma.zj} \cdot n_{\text{min}}} \quad (5.195)$$

где ε_M – коэффициент, принимаемый равным 0,65 для легированной стали [34]; σ_1 – предел выносливости материала вала, равный 295 МПа в соответствии с пособием [34]; $K_{\sigma.zj}$ – коэффициент, учитывающий шпоночные соединения и принимаемый равным 1,34, поскольку в местах соединения вала с мешалкой имеются шпоночные канавки, выполненные торцевой фрезой [34]; n_{min} – коэффициент, ориентировочно принимаемый равным 2 [34].

Тогда:

$$\sigma_{\text{д}} = \frac{\varepsilon_M \cdot \sigma_1}{K_{\sigma.zj} \cdot n_{\text{min}}} = 71.549 \text{ МПа}$$

5.9.49 Произведём проверку выполнения условия прочности:

$$\sigma_{\text{экв}} = 3.916 \text{ МПа} < \sigma_{\text{д}} = 71.549 \text{ МПа}$$

Неравенство выполняется, в связи с чем можно заключить, что надёжность конструкции вала по механической прочности обеспечена.

5.9.50 Резюмируем произведённый расчёт:

- прочность вала по условию виброустойчивости – обеспечена (пункт 5.9.15);
- прочность вала по условию жёсткости – обеспечена (пункт 5.10.40);
- выполнение условия механической прочности вала – обеспечено (пункт 5.9.49).

Таким образом, делаем вывод, что надёжность конструкции вала обеспечена по всем необходимым критериям.

5.10 Расчёт укрепления отверстий в реакторе синтеза полипропилена

Названия элементов – торцевое уплотнение, отверстия для технологических штуцеров в аппарате для производства полипропилена. Обозначение на расчётной модели – 4, А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З.

Схема расположения штуцеров на поверхности аппарата наиболее полно дана в расчётной модели.

Схема для расчёта укрепления отверстий представлена на рисунке 21.

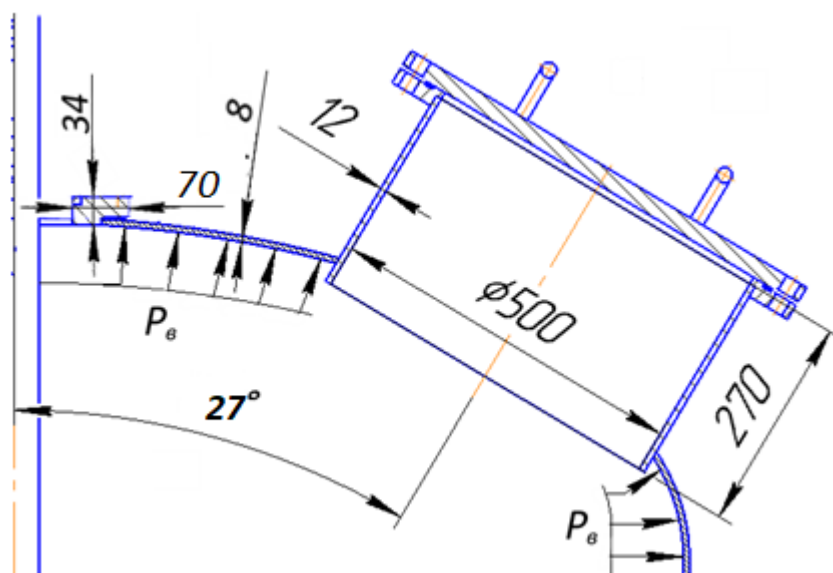


Рисунок 21 – Расчётная схема укрепления взаимовлияющих отверстий для торцевого уплотнения и люка-лаза

где p_v – внутреннее избыточное давление в аппарате при рабочих условиях или пробное давление при условиях гидроиспытания, МПа.

Исходные данные для расчёта:

- рабочее давление в рубашке, МПа, $p_{руб} = 0,1$;
- пробное давление в рубашке при гидравлическом испытании, МПа, $p_{и,руб} = 0,2$ (пункт 5.3);
- избыточное давление на крышку и днище корпуса, МПа, $p_n = 0,729$ МПа (пункт 5.1);
- пробное давление в корпусе при гидравлическом испытании, МПа, $p_{и} = 1,282$ МПа (пункт 5.1);

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		108

- исполнительная толщина стенки обечайки корпуса, днища и крышки, мм, $s = 8$ (пункты 5.1 и 5.2);
- исполнительная толщина стенки обечайки и днища рубашки, мм, $s_{руб} = 8$ (пункт 5.3);
- расчётная толщина стенки днища и крышки, мм $s_{1p} = 5,3$ (пункт 5.2);
- расчётная толщина стенки обечайки и днища рубашки, мм, $s_{p,руб} = 1,258$ (пункт 5.3);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при рабочих условиях, МПа, $\sigma_d = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при условиях гидравлического испытания, МПа, $\sigma_{d,20} = 218$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);

Геометрические параметры всех штуцеров указаны в таблице 3 настоящей работы.

Целью расчёта является проверка надёжности конструкции отверстий по критерию прочности, а также проверка взаимного влияния отверстий по этому же критерию. Условие укрепления одиночного отверстия:

$$l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \geq (5.196) \\ \geq 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p$$

где l_{1p} , l_{2p} , l_{3p} , l_p – расчётные длины внутренней и внешней части штуцера, накладного кольца и зоны укрепления вокруг отверстия, мм; s_1 , s_2 , s_3 , s – исполнительные толщины внутренней и внешней части штуцера, накладного кольца и зоны укрепления вокруг отверстия, мм; s_{1p} , s_p – расчётные толщины внутренней части штуцера и зоны укрепления вокруг отверстия, мм; c_s , c_{s1} , c – прибавки на различные виды разрушений для штуцеров, укрепляющих элементов и зоны укрепления; d_p – расчётный диаметр отверстия, мм; d_{op} – расчётный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления, χ_1 , χ_2 , χ_3 – отношения допускаемых напряжений материалов обечайки и штуцера [46].

Условие прочности для одиночного и взаимовлияющих отверстий:

$$p \leq p_d \quad (5.197)$$

p – расчётное внутреннее давление на зону укрепления отверстия или перемычку между взаимно влияющими отверстиями, МПа; p_d – допускаемое внутреннее давление на зону укрепления отверстия или перемычку между взаимно влияющими отверстиями [46].

5.10.1 Расчётные диаметры укрепляемых элементов для штуцеров, расположенных нормально к поверхности обечайки и смещённых штуцеров на эллиптическом днище:

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		109

$$D_p = D, (5.198)$$

$$D_p = 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^2} (5.199)$$

где x – расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, мм [46].

Поскольку исполнительные и расчётные толщины укрепляемых элементов уже определены в пунктах работы с 5.1 по 5.3, необходимо рассчитать для каждого из отверстий максимальный диаметр, не требующий дополнительного укрепления, при наличии избыточной толщины стенки укрепляемого элемента:

$$d_o = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} (5.200)$$

где s – исполнительная толщина укрепляемого элемента, мм; s_p – расчётная толщина укрепляемого элемента [46].

Все имеющиеся отверстия в данный момент рассматриваются как одиночные.

Поскольку в данном случае мы имеем дело с большим количеством однотипных расчётов, структурируем их в таблицу 6, воспользовавшись упомянутыми сверху формулами.

Таблица 6 – Расчёт диаметров отверстий, не требующих дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда

Обозначение	D_y по [28], мм	D , мм	x , мм	D_p , мм	s , мм	s_p , мм	d_o , мм
А	40	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
Б	32	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
В	20	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
Г	50	1950		1950	8	1,259	857,91
Д	50	1950	300	3759	8	1,258	1192,3
Е	40	1800	0	3600	8	5,3	97,61
Ж	25	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
З	25	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
Л	500	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678

Как видно из приведённой выше таблицы, необходимо проверить условие укрепления одиночного отверстия для люка-лаза.

5.10.2 Расчётный диаметр люка-лаза [46]:

$$d_{p.Л} = \frac{d_{Л} + 2 \cdot c}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D_{p.Л}}\right)^2}} = 535.511 \text{ мм} \quad (5.201)$$

где $d_{Л}$ – принятый исполнительный диаметр отверстия, равный 500 мм.

5.10.3 Расчётный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления [46]:

$$d_{o.p.Л} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{p.Л} \cdot (s - c)} = 54.614 \text{ мм} \quad (5.202)$$

5.10.4 Расчётная длина зоны укрепления [46]:

$$l_{p.Л} = \sqrt{D_{p.Л} \cdot (s - c)} = 193.084 \text{ мм} \quad (5.203)$$

5.10.5 Проверим, соблюдается ли условие укрепления одиночных отверстий для люка лаза при наличии штуцера без укрепляющего кольца. Люк-лаз вварен внутрь аппарата на длину $l_{3.Л} = 5$ мм, выдаётся на $l_{1.Л} = 257$ мм от поверхности эллиптической крышки. Толщина штуцера под люк лаз постоянна и равна 12 мм. Поскольку штуцера изготавливаются из той же стали 12Х18Н10Т, что и корпусные элементы, все соотношения допускаемых напряжений равны 1. Коэффициенты прочности сварных швов также принимаются равными 1. Прибавку на коррозию ввиду единства среды для штуцеров примем также единой и равной 2 мм. Тогда:

$$\begin{aligned} l_{1Л} \cdot s_{1.Л} \cdot \chi_1 + l_{3.Л} \cdot s_{3.Л} \cdot \chi_3 = \\ = 3.144 \cdot 10^3 \text{ мм} \geq 0.5 \cdot (d_{p.Л} - d_{o.p.Л}) \cdot s_p = 1.276 \cdot 10^3 \text{ мм} \end{aligned}$$

Условие укрепления отверстия под люк лаз штуцером с условным проходом 500 мм выполняется.

5.10.6 Шесть штуцеров различного диаметра расположены на контуре окружности радиусом $x = 525$ мм вокруг отверстия под торцевое уплотнение, равное 235 мм. Минимальное расстояние между соседними штуцерами, которые можно считать одиночными [46]:

$$b = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 273.071 \text{ мм} \quad (5.204)$$

При расчётном диаметре для торцевого уплотнения, равном 3600 мм, минимальное расстояние между торцевым уплотнением и штуцером, находящимся на окружности, по аналогии с формулой (5.204):

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		111

$$b_1 = \sqrt{D_{p.y} \cdot (s - c)} + \sqrt{D_{p.l} \cdot (s - c)} = 283.505 \text{ мм}$$

Как видно из модели, приняты такие конструктивные решения, при которых только одна пара отверстий на крышке вступает во взаимное влияние, а именно – люк-лаз и отверстие под торцевое уплотнение. Произведём их проверку по условию прочности.

5.10.7 Коэффициент понижения прочности для одиночного отверстия [46]:

$$V_1 = \min \left[1, \frac{1 + \frac{l_{1.l} \cdot s_{1.l} \cdot \chi_1 + l_{3.l} \cdot s_{3.l} \cdot \chi_3 + l_{2.y} \cdot s_{2.y} \cdot \chi_2}{b_{y.l} \cdot s}}{K_3 \cdot \left(0.8 + \frac{d_y + d_l}{2 \cdot b_{y.l}} \right) + K_1 \cdot \left(\frac{d_y}{D_{p.y}} \cdot \frac{\phi}{\phi_y} \cdot \frac{l_{1.y}}{b_{y.l}} + \frac{d_l}{D_{p.l}} \cdot \frac{\phi}{\phi_l} \cdot \frac{l_{1.l}}{b_{y.l}} \right)} \right] = 1 \quad (5.205)$$

где K_1 – коэффициент, принимаемый для эллиптических крышек равным 2; K_3 – коэффициент, рассчитываемый по формуле [46]:

$$K_3 = \frac{1 + \cos(\beta)^2}{2} = 0.875 \quad (5.206)$$

где β – угол, определяющий положение штуцера на крышке и конструктивно принятый равным 30° .

5.10.7 Допускаемое давление для рабочих условий и условий испытаний [46]:

$$p_d = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d}{0.5 \cdot (D_{p.y} + D_{p.l}) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 1.215 \text{ МПа} \quad (5.207)$$

$$p_{d.и} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{d.20}}{0.5 \cdot (D_{p.y} + D_{p.l}) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2.272 \text{ МПа}$$

5.10.8 Проверим выполнение условие прочности одиночных отверстий:

$$p = 0.729 \text{ МПа} < p_d = 1.215 \text{ МПа}$$

$$p = 1.282 \text{ МПа} < p_{d.и} = 2.272 \text{ МПа}$$

Условие прочности отверстия под люк-лаз выполняется как при рабочих условиях, так и при условиях испытания. Следовательно, принятый штуцер люка-лаза с условным проходом 500 мм, толщиной стенки 12 мм и длиной 270 мм обеспечивает надёжность конструкции.

5.11 Расчёт шпоночного соединения вала с мешалкой

Названия элементов – гладкий однопролётный вал аппарата, трёхлопастные мешалки. Номера позиций на расчётной модели – 6 и 14.

Схема для расчёта шпоночного соединения представлена на рисунке 22.

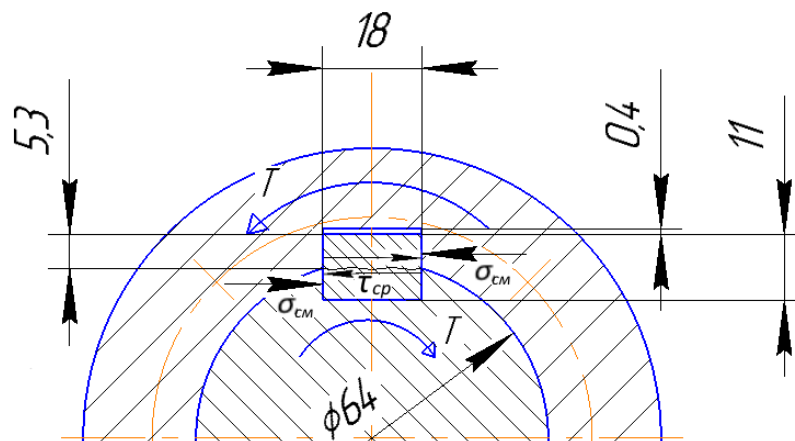


Рисунок 22 – Расчётная схема шпоночного соединения однопролётного вала с трёхлопастной мешалкой

где T – крутящий момент на валу, Н*м; $\sigma_{см}$ – напряжение смятия шпонки, МПа; $\tau_{ср}$ – напряжение шпонки на срез, МПа.

Исходные данные для расчёта:

- крутящий момент на валу, Н*м, $T = 79,787$ (пункт 5.10);
- диаметр вала, мм, $d = 65$ (пункт 3.2);
- ширина шпонки, мм, $b = 18$ [47];
- рабочая длина шпонки, мм, $l_p = 45$ [47];
- справочный размер шпонки для расчёта на смятие, мм, $K = 4$ [47];
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при работе шпоночного соединения, МПа, $\sigma_d = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]).

Целью расчёта является проверка надёжности конструкции шпоночного соединения по прочности на смятие и срез. Условия прочности на смятие и срез:

$$\sigma_{см} \leq \sigma_{д.см} \quad (5.208)$$

$$\tau_c \leq \tau_{д.с} \quad (5.209)$$

где $\sigma_{см}$ – расчётное значение напряжения шпонки на смятие, МПа; τ_c – расчётное значение напряжения шпонки на срез, МПа [49].

Все вычисления производятся в соответствии с пособием [49]:

5.11.1 Для соединения вала с мешалкой принята призматическая шпонка по стандарту [47]. Расчётное напряжение на смятие [49]:

$$\sigma_{см} = \frac{2 \cdot T}{d \cdot l_p \cdot K} = 6.819 \text{ МПа} \quad (5.210)$$

5.11.2 Расчётное напряжение на срез [49]:

$$\tau_c = \frac{2 \cdot T}{d \cdot l_p \cdot b} = 1.515 \text{ МПа} \quad (5.211)$$

5.11.3 Поскольку шпоночное соединение будет контактировать с агрессивной средой в аппарате, необходимо изготавливать шпонки из той же стали 12Х18Н10Т, что и основные детали реактора. В соответствии с рекомендациями [49] допускаемые напряжения на смятие и срез принимаются как:

$$\sigma_{д.см} = (2...2.5) \cdot \sigma_d \quad (5.212)$$

$$\tau_{д.с} = (0.7...0.8) \cdot \sigma_d \quad (5.213)$$

То есть:

$$\sigma_{д.см} = 2 \cdot \sigma_d = 310 \text{ МПа},$$

$$\tau_{д.с} = 0.7 \cdot \sigma_d = 108.5 \text{ МПа}$$

5.11.4 Произведём проверку выполнения условий прочности на смятие и срез:

$$\sigma_{см} = 6.819 \text{ МПа} < \sigma_{д.см} = 310 \text{ МПа}$$

$$\tau_c = 1.515 \text{ МПа} < \tau_{д.с} = 108.5 \text{ МПа}$$

Условия прочности выполняются. Делаем вывод, что принятая призматическая шпонка с шириной 18 мм и рабочей длиной 45 мм обеспечивает надёжность конструкции соединения.

6 Поверочный расчёт реактора синтеза полипропилена

При поверочном расчёте осуществляется оценка надёжности всей конструкции аппарата во время его работы. Рассмотрим некоторые нагрузки, для которых необходим поверочный расчёт:

- химический реактор не испытывает в процессе работы дополнительных температурных деформаций, которые не были бы учтены в разделах с 2 по 5. В конструкции реактора нет деформирующихся под действием температуры деталей, которые были бы жёстко закреплены с двух сторон, как это происходит в теплообменных аппаратах;
- опорные нагрузки для реактора синтеза полипропилена были рассчитаны в пункте 5.8 настоящей работы, дополнительных опорных нагрузок реактор не испытывает;
- поскольку в согласии с пунктом 3.5 настоящей работы было принято расположить реактор в перекрытии между этажами цеха, нет необходимости производить его расчёт на ветровую или снеговую нагрузку;
- предполагается осуществление установки и ведение реактора в эксплуатацию в Томской области либо ближайших к ней областях. Эти области не подвержены значительному воздействию сейсмической активности, а потому нет необходимости в проведении данного поверочного расчёта.

Таким образом, можно сделать вывод, что в дополнительных поверочных расчётах химического реактора для производства полипропилена нет необходимости.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Студент		Полонский М.С.			Поверочный расчёт реактора синтеза полипропилена		
Руковод.		Беляев В.М.					
Конс.							
Н. Контр.							
Руков. ООП		Краснокутская Е.А.					
						Лит.	Лист
						Д	Листов
							115
							1

7 Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена

В соответствии с произведёнными расчётами были приняты следующие конструктивные решения:

- аппарат – химический реактор для получения полипропилена;
- положение аппарата – вертикальное;
- тип аппарата – с механическим перемешивающим устройством;
- число мешалок – две;
- тип мешалки – трёхлопастная;
- диаметр мешалки – 560 мм;
- тип привода – I с концевой опорой;
- мощность привода – 1,5 кВт;
- тип вала – однопрлётный;
- длина вала – 5687 мм;
- тип соединения вала с мешалкой – шпоночное;
- тип шпонки – призматическая по [47];
- тип муфт на валу – втулочно-пальцевые;
- тип уплотнения вала – торцевое;
- объём аппарата – $12,5 \text{ м}^3$;
- внутренний диаметр аппарата – 1800 мм;
- высота аппарата – 5180;
- тип крышек и днищ – эллиптические по [35];
- тип теплообменного устройства – гладкая рубашка;
- тип теплоносителя в рубашке – холодная вода;
- внутренний диаметр рубашки – 1950 мм;
- высота рубашки – 4050 мм;
- площадь поверхности теплообмена – $23,3 \text{ м}^2$;
- тип соединения корпуса с крышкой – фланцевое, исполнения 2 и 3 по [37];
- тип опор – опорные лапы по [41];

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Студент		Полонский М.С.			<i>Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена</i>		
Руковод.		Беляев В.М.					
Конс.							
Н. Контр.							
Руков. ООП		Краснокутская Е.А.					
						Лит.	Лист
						Д	116
							4

- число опорных лап – 4;
- число технологических штуцеров – 8;
- характеристики штуцеров – по [28] (см. таб.3).

Проверку различных условий, осуществляющуюся в течение расчётов, приведённых в настоящей работе, продемонстрируем в форме таблицы 7.

Таблица 7 – Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Технологи- ческий расчёт	Корпус аппарата	Объём, м ³	12,5	—
		Внутренний диаметр, мм	1800	—
		Высота, мм	5180	—
	Вал аппарата	Частота вращения, об/мин	180	—
	Привод	Мощность, кВт	1,5	—
	Теплообменная рубашка	Поверхность теплообмена, м ²	23,285	22,77
		Внутренний диаметр, мм	1950	—
		Высота, мм	4050	—
	Технологические штуцера	Условный проход, мм	(см. таб. 2)	—
		Толщина стенки, мм	(см. таб. 2)	—
		Длина, мм	(см. таб. 2)	—
Механиче- ский расчёт	Цилиндрическая обечайка корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,729	1,03
		Давление для условий испытания, МПа	1,282	1,449
	Эллиптическое днище корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,729	1,032
		Давление для условий испытания, МПа	1,282	1,451

Продолжение таблицы 7

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Механический расчёт	Эллиптическая крышка корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,729	1,032
		Давление для условий испытания, МПа	1,282	1,451
	Цилиндрическая обечайка рубашки аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,1	0,942
		Давление для условий испытания, МПа	0,2	0,951
	Эллиптическое днище рубашки аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,1	0,942
		Давление для условий испытания, МПа	0,2	0,951
	Сопряжение эллиптической и цилиндрической обечаек корпуса	Максимальное краевое напряжение, Па	$4,5 \cdot 10^7$	$2,015 \cdot 10^8$
	Сопряжение эллиптической и цилиндрической обечаек рубашки	Максимальное краевое напряжение, Па	$8,125 \cdot 10^6$	$1,996 \cdot 10^8$
	Сопряжение рубашки с корпусом	Толщина сопряжения, мм	8	—
		Давление в рубашке	0,1	0,313
	Фланцевое соединение	Напряжение в болтах при затяжке, МПа	127,81	147
		Напряжение в болтах при рабочих условиях, МПа	89,064	143

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.061526.001 ПЗ

Лист

118

Продолжение таблицы 7

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Механический расчёт	Фланцевое соединение	Удельное давление на прокладку, МПа	33,9	40
		Максимальное напряжение во фланце при затяжке, МПа	584,3	717,6
		Максимальное напряжение во фланце при рабочих условиях, МПа	637,2	694,3
		Угол поворота, °	0,012	0,017
	Опорные лапы аппарата	Нагрузка на одну опорную лапу, Н	47798	83940
	Вал аппарата	Условие виброустойчивости	0,593	0,7
		Динамическое смещение центра тяжести в опасном по жёсткости сечении, м	$1,821 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
		Эквивалентное напряжение в опасном по прочности сечении, МПа	3,92	71,5
	Отверстия под люк-лаз и торцевое уплотнение	Давление на перемычку между отверстиями в рабочих условиях, МПа	0,729	1,215
		Давление на перемычку между отверстиями в условиях испытания, МПа	1,282	2,272
	Шпоночное соединение вала с мешалкой	Напряжение на смятие, МПа	6,8	310
		Напряжение на срез, МПа	1,515	108,5

8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном разделе выпускной квалификационной работы рассмотрена экономическая целесообразность реализации проекта.

Целью проекта является создание автоматизированной системы проектирования химических реакторов и её реализация на примере реактора с гладкой теплообменной рубашкой и перемешивающим устройством для производства полипропилена.

Сферой применения проекта является одна из отраслей промышленности, а именно – химическое машиностроение.

Потенциальными потребителями результатов реализации проекта являются компании и частные лица, составляющие рынок химического оборудования.

Конечным результатом реализации проекта является удовлетворение двух потребностей:

- предоставление на рынок более энергоэффективного химического оборудования для производства полипропилена;
- упрощение процесса проектирования реакторов различного назначения за счёт создания программы их расчёта на базе MathCAD.

8.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований

В данном подразделе проект химического реактора для производства полипропилена рассмотрен с точки зрения его коммерческой значимости. Необходимые для данного рассмотрения расчёты произведены в соответствии с пособием [49].

					ФЮРА.061526.001 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Студент		Полонский М.С.			Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение				
Руковод.		Беляев В.М.							
Конс.		Верховская М.В.							
Н. Контр.									
Руков. ООП		Краснокутская Е.А.							
					Лит.	Лист	Листов		
					Д			120	18

8.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.

Сегментация рынка

В качестве двух основных критериев сегментирования рынка предполагается выделить:

- географическое положение (территория России, ближнее и дальнее зарубежье);
- тип потребителя (крупные химические компании, мелкие частные фирмы, частные лица).

По выбранным критериям была составлена карта сегментации рынка химического оборудования, отражённая на рисунке 23. В качестве конкурирующих компаний были взяты предприятия Экотех НН Химтехпром, ОАО НИИПТхиммаш и торгово-промышленная компания «Стелла». Информация, необходимая для построения данной карты, была взята с официальных сайтов предприятий [50–52].

		Географическое положение		
		Российская федерация	Ближнее зарубежье	Дальнее зарубежье
Тип потребителя	Государственные компании			
	Частные компании			
	Частные лица			

Рисунок 23 – Карта сегментирования рынка химического оборудования

где:



– Экотех НН
Химтехпропм



– ОАО
НИИПТхиммаш



– ТПК
«Стелла»

В соответствии с приведённой на рисунке 23 картой сегментирования были сделаны выводы:

- основные сегменты рынка химического оборудования в рамках данной работы было целесообразно разделить по признакам географического положения и типам потребителей;

- наиболее благоприятными для продаж химических реакторов на первых этапах развития предприятия, в соответствии с картой, являются сегменты, отображающие частные компании и частных лиц, базирующихся в Российской Федерации;
- привлекательными для предприятия в будущем, в соответствии с картой, представляются сегменты государственных компаний Российской Федерации и частных компаний ближнего зарубежья, однако в данном сегменте предстоит столкнуться с высокой конкуренцией.

8.1.2 Оценка перспективности разработки

Для оценки качества предлагаемой научной разработки и перспектив её коммерческого успеха была использована технология QuaD.

Для проведения анализа проекта по технологии QuaD были предварительно распределены веса критериев, по которым оценивается научная разработка. В рамках производства химических реакторов одними из наиболее весомых критериев были выбраны:

- энергоэффективность – 0,12;
- надёжность – 0,12;
- безопасность – 0,1;
- простота эксплуатации – 0,1;
- ремонтпригодность – 0,1;
- цена – 0,1.

В соответствии с результатами конструктивно-механического расчёта химического реактора одними из наивысших баллов были отмечены следующие критерии:

- простота эксплуатации – 96;
- унифицированность – 95;
- надёжность – 94;
- безопасность – 93;
- энергоэффективность – 92.

В соответствии с пособием [49] список критериев, их веса, а также необходимые расчётные величины заносятся в таблицу 8.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		122

Таблица 8 – Оценочная карта для анализа по технологии QuaD [49]

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,12	92	100	0,92	0,1104
2. Помехоустойчивость	0,05	91	100	0,91	0,0455
3. Надёжность	0,12	94	100	0,94	0,1128
4. Унифицированность	0,05	95	100	0,95	0,0475
5. Уровень материалоёмкости разработки	0,08	75	100	0,75	0,06
6. Уровень шума	0,01	82	100	0,82	0,0082
7. Безопасность	0,1	93	100	0,93	0,093
8. Потребность в ресурсах памяти	0,005	85	100	0,85	0,00425
9. Функциональная мощность	0,02	87	100	0,87	0,0174
10. Простота эксплуатации	0,1	96	100	0,96	0,096
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,005	83	100	0,83	0,00415
12. Ремонтопригодность	0,1	90	100	0,9	0,09
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13. Конкурентоспособность продукта	0,04	79	100	0,79	0,0316
14. Уровень проникновения на ры-нок	0,01	65	100	0,65	0,0065
15. Перспектив-ность рынка	0,01	78	100	0,78	0,0078

Продолжение таблицы 8

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
16. Цена	0,1	72	100	0,72	0,072
17. Послепродажное обслуживание	0,03	81	100	0,81	0,0243
18. Финансовая эффективность научной разработки	0,03	74	100	0,74	0,0222
19. Срок выхода на рынок	0,01	69	100	0,69	0,0069
20. Наличие сертификации разработки	0,01	68	100	0,68	0,0068
Итого	1				0,85805

Величина, помещённая в графе таблицы «Итого», рассчитана по формуле из [49]:

$$P_{cp} = \sum_{i=1}^{20} (B_i \cdot B_i) \quad (8.1)$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – средневзвешенное значение i -го показателя [49].

В соответствии с предложенной в [49] классификацией можно говорить о перспективности научной разработки, поскольку значение средневзвешенного показателя качества и перспективности составило 0,86 или 86 баллов. Однако, в результате анализа было выяснено, что слабостью разработки могут оказаться уровень проникновения и сроки выхода на рынок. Эти слабые места необходимо учесть в последующих частях данного раздела работы, а именно – в SWOT-анализе.

8.1.3 SWOT-анализ разработки

В рамках данного подраздела был произведён анализ сильных и слабых сторон разработки, рассмотрены перспективы возникновения благоприятных возможностей и угроз, а также дан анализ их корреляции. Матрица SWOT-анализа представлена в данной работе в виде таблицы 9 [49].

Таблица 9 – Матрица SWOT [49]

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Заявленная энергоэффективность аппарата.</p> <p>С2. Экологичность аппарата.</p> <p>С3. Высокая ремонтпригодность аппарата.</p> <p>С4. Конструкция реактора проста.</p> <p>С5. Продуктом является как сам реактор, так и программа для его расчёта.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Нет прототипа разработки.</p> <p>Сл2. Разработка требует большого количества времени.</p> <p>Сл3. Проектируемый аппарат предназначен только для производства только одного продукта.</p> <p>Сл4. Нет возможности быстро организовать производство аппаратов.</p> <p>Сл5. Отсутствие большого опыта проектирования у инженеров-дипломников.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Координация деятельности ТПУ с компаниями, являющимися ведущими в химической отрасли.</p> <p>В2. Финансирование разработки университетом.</p> <p>В3. Возможность задействования сторонних специалистов для развития проекта.</p> <p>В4. Близость одной из химических компаний к месту проектирования (Томскнефтехим).</p> <p>В5. Возникновение дополнительного спроса на производимый продукт (полипропилен).</p>	<p>Сильные стороны и возможности:</p> <p>1. Имеется перспектива дальнейшего развития проекта при сотрудничестве с другими подразделениями ТПУ.</p> <p>2. Есть возможность установить контакт с компаниями, производящими химическое оборудование, по каналам связи университета.</p> <p>3. Привлечение в проект дополнительных специалистов повысит экологичность и энергоэффективность проекта.</p> <p>4. При работе с более опытными специалистами возникает возможность усовершенствования технологии расчёта реакторов и её переноса на базу более совершенных вычислительных программ.</p> <p>5. Увеличение спроса на полипропилен приведёт к повышению спроса на оборудование для его производства.</p>	<p>Слабые стороны и возможности:</p> <p>1. Относительная универсальность полученной программы компенсирует однозадачность проекта.</p> <p>2. Создание прототипа аппарата может быть профинансировано ТПУ или другими организациями, заинтересованными в разработке.</p> <p>3. Привлечение более опытных специалистов нивелирует недостатки начальной команды.</p> <p>4. Разработка аппарата может быть ускорена через сотрудничество с компаниями-партнёрами.</p> <p>5. Внедрение аппарата в производство также может быть произведено на базе одной из компаний-партнёров.</p>

Продолжение таблицы 9

<p>Угрозы: У1. Падение спроса на продукт, производимый аппаратом. У2. Угроза возникновения сложностей в поставке катализатора полимеризации. У3. Малое число потенциальных потребителей. У4. Склонность к импорту оборудования из дальнего зарубежья. У5. Введение новых государственных требований к производству продукции.</p>	<p>Сильные стороны и угрозы: 1. Проект можно переориентировать на реакторы для других продуктов ввиду универсальности программы. 2. Для преодоления конкуренции импортного оборудования необходимо будет на первых этапах внедрения аппаратов на рынок ориентироваться на менее крупного потребителя, а именно – на мелкие компании и на частных лиц. 3. Ввиду принятых в процессе проектирования реактора решений изменения в области стандартизации продукции не отразятся на проекте значительно и не потребуют его переработки.</p>	<p>Слабые стороны и угрозы: 43. Точное сегментирование рынка позволит избежать проигрышной конкуренции с крупными или импортными компаниями, а также снизит вред такого недостатка, как однозадачность разработки. 12. Выступление с результатами проекта на научно-практической конференции позволят повысить известность команды и, в случае победы, найти спонсора для промышленной реализации проекта. 54. Перестройка программы под реакторы для иных продуктов потребует увеличения времени проектирования, однако этот фактор также можно проконтролировать привлечением специалистов из сторонних организаций. 4. При введении новых требований в области стандартизации необходимо увеличить время разработки проекта и скорректировать некоторые детали расчётов в соответствии с новыми стандартами и нормами.</p>
---	---	--

Результаты SWOT-анализа показывают, что универсальность программы, по которой рассчитывается химический реактор, позволяет решить большую часть внешних проблем, с которыми предстоит столкнуться разработчикам, в частности – падение спроса на продукт производства и ужесточение норм в области стандартизации.

В свою очередь, контакты в ТПУ и привлечение специалистов различного профиля в проект позволят развить его изнутри и повысить общий профессионализм команды.

8.2 Планирование научно-исследовательских работ

В данном разделе изложены аспекты планирования научно-исследовательской работы, перечислены этапы, необходимые для проектирования аппарата, подсчитано время, которое должно быть затрачено на выполнение каждого этапа и построена диаграмма, позволяющая рационально распределить временной ресурс между руководителем проекта и инженером.

8.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование структуры работ включает в себя составление перечня этапов, необходимых для исполнения проекта химического реактора для полипропилена. Такой перечень дан в таблице 10 [49]. Подпунктам основных этапов разработки в рамках данной таблицы присвоена сквозная нумерация, которая и далее будет использоваться в данной работе. Кроме того, было произведено распределение ответственности за выполнение той или иной работы между руководителем проекта и инженером, исполняющим данный проект.

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Проведение патентных исследований	Инженер
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер

Продолжение таблицы 10

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор направления исследований	5	Выбор и анализ технологической схемы	Руководитель, инженер
	6	Календарное планирование работ по теме	Инженер
Проведение исследования	7	Проведение технологических расчётов	Инженер
	8	Проведение конструктивно-механических расчётов	Инженер
	9	Осуществление теоретического анализа в области экологии	Инженер
	10	Оценка экономической значимости проекта	Инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности и обобщение полученных результатов	Руководитель, инженер
Разработка технической документации	12	Составление и оформление пояснительной записки	Инженер

Продолжение таблицы 10

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технической документации	13	Изготовление чертежей и другого графического материала	Инженер
Представление проекта	14	Представление результатов научно-исследовательской работы	Инженер

8.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ

Рассмотрим в качестве примера расчёта трудоёмкости этап работы, заключающийся в составлении и утверждении технического задания. Исполнителем на данном этапе является руководитель дипломного проекта. При наиболее благоприятных условиях для анализа, систематизации и представления информации в виде технического задания руководителю потребуется 2 человеко-дня. В случае наиболее неблагоприятных условий, которые могут включать большую загруженность или болезнь, составление технического задания может занять 4 человеко-дня. Исходя из предложенной в [49] формулы, осуществляем расчёт ожидаемой трудоёмкости для первого этапа работы:

$$t_{\text{ож.1}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min.1}} + 2 \cdot t_{\text{max.1}}}{5} = 2.8 \text{ чел-дн (8.2)}$$

где $t_{\text{ож.1}}$ – ожидаемая трудоёмкость 1 работы; $t_{\text{min.1}}$ – минимальная трудоёмкость 1 работы, чел-дн; $t_{\text{max.1}}$ – максимальная трудоёмкость 1 работы, чел-дн [49].

Поскольку руководитель выполняет данную работу один, в соответствии с формулой из пособия [49] продолжительность работы составит:

$$T_{\text{р.1}} = \frac{t_{\text{ож.1}}}{\text{ч}_1} = 2.8 \text{ (8.3)}$$

где $T_{p.1}$ – продолжительность 1 работы, раб. дн.; $Ч_1$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел [49].

Подобные рассуждения и расчёты осуществляются для всех подпунктов основных этапов научно-исследовательской работы.

8.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

В рамках данного подпункта осуществлено построение диаграммы Ганта и проведены необходимые расчёты для её построения.

При построении графика необходимо перевести рабочие дни в календарные, для чего используется следующая формула:

$$T_{k.i} = T_{p.i} \cdot k_{\text{кал}} \quad (8.4)$$

где $T_{k.i}$ – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности [49].

Данный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (8.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – число календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ – число выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ – число праздничных дней в году [49].

В 2017 году, для которого производится расчёт, число календарных дней составило 365, праздничных – 14, выходных – 104. Таким образом, по формуле (8.5):

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{(365 - 104 - 14)} = 1.48$$

Примем коэффициент календарности равным 1,5. Все рассчитанные значения заносятся в таблицу 11 [49].

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования [49]

Номер работы	Трудоёмкость работ			Число исполнителей	Длительность работ в рабочих днях	Длительность работ в календарных днях
	t_{\min} , чел-дн	t_{\max} , чел-дн	$t_{\text{ож}}$, чел-дн			
1	2	4	2,8	1	3	4
2	5	8	6,2	1	6	9

Продолжение таблицы 11

Номер работы	Трудоёмкость работ			Число испол- нителей	Длитель- ность работ в рабочих днях	Длитель- ность работ в кален- дарных днях
	t_{\min} , чел-дн	t_{\max} , чел-дн	$t_{\text{ож}}$, чел- дн			
3	4	5	4,4	1	4	7
4	1	2	1,4	2	1	1
5	1	2	1,4	2	1	1
6	2	4	2,8	1	3	4
7	5	12	7,8	1	8	12
8	16	28	20,8	1	21	31
9	3	10	5,8	1	6	9
10	3	10	5,8	1	6	9
11	1	2	1,4	2	1	1
12	8	10	8,8	1	9	13
13	8	10	8,8	1	9	13
14	1	1	1	1	1	1

Общая длительность работ в рабочих днях составила 79 дней, в календарных – 115.

Диаграмма Ганта для научно-исследовательской работы в целях проектирования химического реактора для производства полипропилена представлена на рисунке 24.

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т.к.и, кал. дн.																		
				фев		мар			апр			май			июн						
				1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
1	Составление ТЗ	Руководитель	4																		
2	Изучение теории	Инженер	9																		
3	Патентный поиск	Инженер	7																		
4	Выбор направления	Руков., инж.	1																		
5	Анализ схемы	Руков., инж.	1																		
6	Календарное планирование	Руководитель	4																		
7	Тех. Расчёт	Инженер	12																		
8	Мех. Расчёт	Инженер	31																		
9	Экология	Инженер	9																		
10	Менеджмент	Инженер	9																		
11	Подведение итогов	Руков., инж.	1																		
12	Составление ПЗ	Инженер	13																		
13	Создание чертежей	Инженер	13																		
14	Презентация	Инженер	1																		

Рисунок 24 – Календарный план график проведения НИР по теме

8.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ следует в первую очередь отметить, что не все из упомянутых в [49] статей будут реализовываться в рамках данного проекта. Список расходов, подлежащих расчёту, имеет следующий вид:

- материальные затраты НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

8.3.1 Расчёт материальных затрат НТИ

Поскольку в рамках выполнения бакалаврской работы не предполагается закупка каких-либо материальных ресурсов, создание и испытание прототипа, в данном подпункте была рассчитана только стоимость электроэнергии, необходимая для работы двух ЭВМ, на которых осуществлялось проектирование.

Зададимся следующими условиями:

- мощность, потребляемая устройством: во время работы – 220 Вт;
- количество рабочих дней по плану – 79;
- тариф на электроэнергию – 5 рублей 80 копеек за 1 кВт*ч.

Формула для расчёта стоимости электроэнергии:

$$Q = N \cdot t \cdot P \text{ (8.6)}$$

где Q – стоимость электроэнергии, руб; N – мощность, потребляемая компьютером во время работы, кВт; t – время работы компьютера, ч; P – тариф на электроэнергию в данном субъекте РФ, руб за кВт*ч.

Тогда:

$$Q = \frac{220}{1000} \cdot (79 \cdot 24) \cdot 5.8 = 2419.3 \text{ руб}$$

Полученное значение умножим на два, поскольку на персональных компьютерах будет работать как инженер, так и научный руководитель. Таким образом, получим, что расходы на электроэнергию составят 4838 рублей 59 копеек.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		132

8.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В исполнении проекта, описываемого в данной бакалаврской работе, задействованы два работника: руководитель и инженер. Пример расчёта основной заработной платы дадим на примере руководителя, результаты расчёта для инженера будут занесены в сводную таблицу.

По рекомендации консультанта по разделу работы «Финансовый менеджмент» месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{ок}} \cdot k_{\text{р}} \quad (8.7)$$

где $З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб; $З_{\text{ок}}$ – оклад работника, руб; $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный для Томска 1,3 [49].

Поскольку научным руководителем является доцент, его оклад составляет 33664 рубля. Таким образом:

$$З_{\text{м}} = 33664 \cdot 1.3 = 43763.2 \text{ руб}$$

Для расчёта среднедневной заработной платы используется формула из [49]:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} \quad (8.8)$$

где $З_{\text{д}}$ – среднедневная заработная плата, руб; M – количество месяцев работы без отпусков в течение года; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. [49].

Расчёт действительного годового фонда рабочего времени сводится в таблицу 12. Учтём, что руководитель работает по шестидневной рабочей неделе, а инженер – по пятидневной.

Таблица 12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
• выходные дни;	52	104
• праздничные дни.	14	14

Продолжение таблицы 12

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Потери рабочего времени: • отпуск; • невыход по болезни.	48	24
	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Количество месяцев работы без отпуска для руководителя-доцента, работающего по шестидневной рабочей неделе с отпуском в 48 рабочих дней, составит 10,4 месяца. Таким образом, по формуле (8.8):

$$З_{\text{дн}} = \frac{43763,2 \cdot 10,4}{251} = 1813,3 \text{ руб}$$

Основная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (8.9)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб; T_p – продолжительность работ, выполняемая научно-техническим работником, раб. дн. [49].

Продолжительность работ для научного руководителя принимаем в соответствии с данными таблицы 11 равной 6 рабочим дням. Таким образом:

$$З_{\text{осн}} = 1813,3 \cdot 6 = 10879,8 \text{ руб}$$

Как и было сказано выше, результаты расчёта основной заработной платы инженера сведены в таблицу 13.

Таблица 13 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Должность	$З_{\text{ок}}$, руб	k_p	$З_m$, руб	$З_{\text{дн}}$, руб	T_p , руб	$З_{\text{осн}}$, руб
Руководитель	Доцент	33664	1,3	43763,2	1813,30	6	10879,8
Инженер	Инженер	9489	1,3	12335,7	619,55	76	47085,86

8.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В соответствии с пособием [49] дополнительная заработная плата исполнителей темы равна:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} \quad (8.10)$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата исполнителей темы, руб; $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, на стадии проектирования принимаемый равным от 0,12 до 0,15 [49].

Примем $k_{\text{доп}}$ равным 0,12. Таким образом, для руководителя:

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 10879,8 = 1305,58 \text{ руб}$$

Для инженера:

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 47085,86 = 5650,3 \text{ руб}$$

8.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

В соответствии с пособием [49] сумма отчислений во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (8.11)$$

где $З_{\text{внеб}}$ – сумма отчислений во внебюджетные фонды, руб; $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (принимается равным 27,1%) [49].

Также по рекомендации пособия [49] расчёт отчислений во внебюджетные фонды оформлен в виде таблицы 14.

Таблица 14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата
Руководитель	10879,8	1305,58
Инженер	47085,86	5650,30
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого	3302,23	14291,50

2.4.5 Накладные расходы и формирование бюджета

В соответствии с пособием [49] накладные расходы рассчитываются по формуле:

$$З_{\text{накл}} = \Sigma \text{ст} \cdot k_{\text{нр}} \quad (8.12)$$

где $З_{\text{накл}}$ – сумма накладных расходов, руб; $\Sigma_{\text{ст}}$ – сумма статей бюджета с первой по четвертую, руб; $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (принимаемый равным 16%) [49].

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведено в таблице 15.

Таблица 15 – Расчёт бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма		Примечание
	Руководитель	Инженер	
1. Материальные затраты НТИ	2419,3	2419,3	Пункт 2.4.1
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	10879,88	47085,86	Пункт 2.4.2
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	1305,58	5650,3	Пункт 2.4.3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	3302,24	14291,50	Пункт 2.4.4
5. Накладные расходы	2865,12	11111,51	16% от суммы статей с 1 по 4
6. Бюджет затрат на НТИ	101330,59		Сумма статей с 1 по 5

8.4 Оценка научно-технического эффекта разработки

Для проведения данной оценки необходимо рассчитать коэффициент научно-

технического эффекта по следующей формуле:

$$H = \sum_{i=1}^4 (k_i \cdot n_i) \quad (8.13)$$

где H – показатель научно-технического эффекта; k_i – весовой коэффициент i -го признака; n_i – оценка i -го признака в баллах.

Признаки научно-технического эффекта разработки систематизируются в соответствующую таблицу 16, в которой также проставляются баллы по каждому признаку.

Таблица 16 – Оценка научно-технического эффекта разработки

Признак НТУ	Весовой коэфф.	Балл	Характеристика разработки	Выбран- ный балл
Уровень новизны	0.6	от 8 до 10 от 5 до 7 от 2 до 4 0	Принципиально новая Новая Относительно новая Не обладает новизной	5
Теоретиче-ский уровень результатов	0.4	10 8 6 2 0.5	Установление закона Глубокая разработка проблемы Разработка способа (программы, устройства) Элементарный анализ Изложение опыта	6
Возможность реализации	0.2	Время реализации		10
		10 4 2	В течение первых лет От 5 до 10 лет Свыше 10 лет	
		Масштаб реализации		
		10 4 2	Народное хозяйство Отрасль Одно или несколько предприятий	4

Таким образом, по формуле (8.13):

$$H = 0.6 \cdot 5 + 0.4 \cdot 6 + 0.2 \cdot 10 + 0.2 \cdot 4 = 8.2$$

В соответствии с полученным результатом оценки разработку реактора, освещаемую в данной бакалаврской работе, можно охарактеризовать как перспективную, а её научно-технический эффект как сравнительно высокий.

9 Социальная ответственность

В рамках данного раздела выпускной квалификационной работы изложены вредные и опасные факторы производства полипропилена на стадии полимеризации в реакторе, представлены пути нейтрализации либо минимизации их вредного влияния на работников, даны рекомендации по предотвращению чрезвычайных ситуаций, а также изложены правила, регламентирующие трудовое законодательство в данной области.

9.1 Производственная безопасность

В рамках данного подраздела рассмотрены вредные и опасные факторы производства полипропилена на стадии полимеризации. Собранные данные систематизированы в таблице 17.

Таблица 17 – Опасные и вредные производственные факторы на стадии полимеризации пропилен

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы по [53].		Нормативные документы
	вредные	опасные	
этилен ПДК* – 100 мг/м ³ [54]	вдыхание: возможна потеря сознания	чрезвычайно огнеопасен	справочник [55] стандарт [56]
пропилен ПДК – 100 мг/м ³ [54]	вдыхание: вызывает сонливость	чрезвычайно огнеопасен; взрывоопасен в смеси с воздухом; кожа: обморожение	справочник [55] стандарт [57]
водород	вдыхание: удушье	чрезвычайно огнеопасен; взрывоопасен в смеси с воздухом; кожа: серьёзное обморожение	справочник [55] стандарт [58]

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Социальная ответственность</i>		
<i>Студент</i>	<i>Полонский М.С.</i>						
<i>Руковод.</i>	<i>Беляев В.М.</i>						
<i>Конс.</i>	<i>Штейнле А.В.</i>						
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Руков. ООП</i>	<i>Краснокутская Е.А.</i>						
					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
					<i>Д</i>	<i>138</i>	<i>10</i>

Продолжение таблицы 17

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы по [53].		Нормативные документы
	вредные	опасные	
гептан ПДК – 100 мг/м ³ [54]	вдыхание: вялость, головная боль; кожа: сухость; глаза: покраснение и боль; проглатывание: колики, жжение, тошнота, рвота	сильно огнеопасен ; взрывоопасен в смеси с воздухом	справочник [55] стандарт [59]
бутанол ПДК – 10 мг/м ³ [54]	вдыхание: кашель, головокружение, Сонливость, головная боль; кожа: сухость, шероховатость; глаза: неясность зрения, жжение; проглатывание: боль в животе, сонливость, рвота	огнеопасен ; пары могут образовывать взрывоопасные смеси с воздухом; глаза: светобоязнь, возможно повреждение роговицы	справочник [55] стандарт [60]
диэтилалюминийхлорид	—	пожароопасен ; раствор представляет собой пирофорную жидкость	справочник [55]
пары соляной кислоты ПДК – 5 мг/м ³ [54]	вдыхание: раздражение дыхательных путей; глаза: раздражение слизистой оболочки;	ожоги кожных покровов; поражение лёгких	стандарт [61]
раствор едкого натра 20% ПДК – 0,5 мг/м ³ [53]	—	кожа: химические ожоги; глаза: потеря зрения	стандарт [62]
азот	удушье при высоких концентрациях в воздухе рабочей зоны	—	стандарт [63]
чистка трубопроводов	воздействие паров вредных веществ	образование взрыво- и пожароопасных смесей	справочник [55] стандарт [64]
работы на трубопроводах пара	—	возможно получение термических ожогов	стандарт [65]
работа с электрооборудованием	—	возможно поражение электрическим током	стандарт [66]

Продолжение таблицы 17

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы по [52].	Нормативные документы	Источник фактора, наименование видов работ
	вредные	опасные	
обслуживание оборудования с вращающимися механизмами	неблагоприятное воздействие шума и вибраций	возможно получение механических травм ; травмы, связанные с воздействием шума и вибраций	стандарты [67–68]
производственный микроклимат	неблагоприятные условия	—	норма [69]
производственное освещение	нерационально спроектированное освещение	—	норма [70]

* – значения ПДК даны для нормы в воздухе рабочей зоны.

В соответствии с данными, систематизированными в таблице 17, а также руководствуясь стандартами и нормами [54, 56–70], можно дать следующие рекомендации по вредным и опасным производственным факторам:

- **поражение органов дыхания.** Источником являются пары различных вредных веществ. Природа фактора химическая. Допустимые нормы приведены в таблице 17 в соответствии со стандартом [54]. Для защиты органов дыхания рекомендуется применять противогаз марки БКФ, респираторы «Лепесток», самоспасатели ПДУ-3. При работе внутри аппаратов применяются шланговые противогазы ПШ-1, ПШ-2.

- **поражение кожи.** Источником являются пары различных вредных веществ, вредные вещества в жидком состоянии, горячий пар. Природа фактора химическая. Для защиты кожных покровов рекомендуется использовать соответствующую спецодежду, производить работы только в резиновых перчатках, при необходимости надевать прорезиненные фартуки.

- **поражение глаз.** Источником являются пары различных вредных веществ и вредные вещества в жидком состоянии. Природа фактора химическая. Защита глаз производится в сочетании с защитой органов дыхания либо при помощи специальных защитных масок.

- **поражение желудочно-кишечного тракта.** Источником являются пары различных вредных веществ и вредные вещества в жидком состоянии. Природа фактора химическая. Для защиты от проглатывания вредных и опасных веществ строго запрещается употреблять еду, напитки, а также курить во время работы.

- **пожаро- и взрывоопасность.** Источником являются пары этилена, пропилена, водорода, гептана и бутанола в смеси с воздухом. Природа фактора физико-химическая. Предел взрываемости в объёмных процентах в воздухе: для этилена – от 2,7 до 6,0; для пропилена – от 2,4 до 10,3; для водорода – от 4 до 76; для гептана – от 1,1 до 6,7; для бутанола – от 1,4 до 11,3 [71]. Рекомендации по безопасности – не допускать в процессе работы оборудования огня, искр, курения, применять вентиляцию и защищённое от взрыва электрооборудование. В качестве средств защиты применять автоматическую систему пенного пожаротушения, пожарные гидранты, огнетушители ОПУ-5.

- **поражение электрическим током.** Источником являются неисправное электрооборудование, оборудование с нарушенной изоляцией, а также поверхности, способные аккумулировать статический электрический заряд. Природа фактора физическая, электрическая. Для обеспечения электробезопасности на производстве необходима регулярная проверка оборудования на исправность, а также создание единой системы заземления во избежание накопления статического заряда. Повышенная электробезопасность в установках достигается применением систем защитного заземления, зануления, защитного отключения и других средств и методов защиты, в том числе знаков безопасности и предупредительных плакатов и надписей.

- **механические травмы.** Источником является оборудование с вращающимися механизмами (реактор с перемешивающим устройством). Природа фактора физическая, механическая. Для обеспечения промышленной безопасности по данному фактору необходимо производить эксплуатацию оборудования в соответствии с технологическим регламентом и правилами техники безопасности.

- **шум и вибрации.** Источником является оборудование с вращающимися механизмами (реактор с перемешивающим устройством). Природа фактора физическая, в том числе акустическая. Допустимые значения параметров шума в производственном помещении- 85 дБ [67]. Норма вибраций 95 дБ [68]. Основными мерами по снижению шума и вибрации на данном производстве являются: средства индивидуальной защита (наушники); строительно- акустические мероприятия.

- **производственный микроклимат.** Источником является различное оборудование, находящееся в помещении. Природа фактора физическая, включающая в себя параметры температуры, влажности и скорости движения воздуха. Нормы для производственного микроклимата: температура рабочей среды от 17°С до 20°, относительная влажность от 40% до 60%, скорость воздуха не более 1 м/с [69].

- **производственное освещение.** Источником являются солнце и различные

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		141

приборы для искусственного освещения помещения. Природа фактора физическая, представляющая собой излучение. Нормы естественного освещения от 280 до 330 лк [70]. Предпочтение может быть отдано освещению на галогеновых лампах (лампы накаливания с йодным цинком) со сроком службы до трех тысяч часов и спектром излучения, близком к естественному. Конструкция светильника должна надежно защищать источник света от пыли и других внешних факторов, обеспечивать электро-, пожаро- и взрывобезопасность, стабильность светотехнических характеристик в данных условиях среды, удобство монтажа и обслуживания. Поскольку в рабочей зоне могут находиться взрывопожароопасные вещества, светильник должен быть взрывобезопасного исполнения типа ВЗГ.

9.2 Экологическая безопасность

В соответствии с перечисленными в предыдущем разделе вредными и опасными производственными факторами, в первую очередь касающимися вредных химических веществ, применяемых при производстве полипропилена, необходимо дать следующие рекомендации в целях соблюдения экологической безопасности.

9.2.1 Защита селитебной зоны

В соответствии с постановлением [72] производство полипропилена является производством II класса опасности и предполагает создание вокруг предприятия санитарно-защитной зоны радиусом 500 м.

9.2.2 Защита атмосферы

Вредными веществами, способными попасть в атмосферу в результате разгерметизации оборудования, являются пропилен, гептан и бутанол. Для защиты оборудования от разгерметизации и попадания вредных веществ в окружающую среду установлены предохранительные клапаны. Газовые выбросы от этих клапанов при ведении технологического процесса направляются в факельный коллектор на сжигание.

Для обеспечения защиты атмосферы доля вредных веществ в промышленных выбросах, должна соответствовать значениям ПДК_{атм.в}, а именно: для пропилена – 3 мг/м³; для гептана – 1,5 мг/м³; для бутанола – 0,1 мг/м³ [73].

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		142

9.2.3 Защита гидросферы

Для защиты гидросферы от вредных веществ, имеющих возможность попасть в среду через стоки предприятия, сточные воды от промывки оборудования и мытья полов должны быть направлены в химзагрязненную канализацию и далее на установку локальной очистки сточных вод для очистки от соединений титана, алюминия, порошка полипропилена, масла. Жидкие отходы непосредственно в отделении полимеризации отсутствуют. ПДК для воды рыбохозяйственных водоёмов составляют: для бутанола – 0,03 мг/дм³; для взвешенных частиц – 0,75 мг/дм³ [74].

9.2.4 Защита литосферы

Загрязнителями литосферы в производстве полипропилена являются твёрдые отходы, состоящие из различных веществ и образующиеся при чистке оборудования. Основу таких отходов составляет порошок полипропилена, их утилизация должна осуществляться посредством сборки в специальные пластиковые контейнеры или полиэтиленовые мешки с последующим отвозом на полигон токсичных отходов. Предельно допустимая концентрация полипропилена в порошкообразном состоянии в почве нормативными документами не устанавливается.

9.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией в рамках производства полипропилена может считаться взрыв или пожар ввиду большого количества легко воспламеняющихся веществ, задействованных в технологии. Общие представления о поведении в чрезвычайных ситуациях даны в стандартах [75, 76].

Защита от возникновения возгорания достигается комплексом мер, частично описанных в предыдущих пунктах данного раздела. В частности, таковыми мерами являются: оборудование цехов огнетушителями, предназначенными для тушения горящих органических веществ; контроль состава воздуха рабочей зоны в целях предотвращения возникновения взрывоопасных смесей; организация заземления оборудования для предотвращения скапливания статического электричества и возникновения пробоев и искр.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		143

При возникновении возгорания на предприятии, содержащем аварийно-опасные химические вещества, следует придерживаться следующего порядка действий:

- установить точное наименование и количество хранящихся веществ;
- привлечь к работе специалистов объекта и в процессе работы согласовывать с ними свои действия;
- применять огнетушащие вещества и способы ликвидации горения с учетом свойств хранящихся веществ;
- предусмотреть отвод загрязненной воды в места, безопасные для людей и животных;
- выбирать позиции ствольщиков преимущественно с наветренной стороны; при образовании облака паров и газов АХОВ, эвакуировать с подветренной стороны людей и животных и организовать осаждение облака путем подачи распыленных струй;
- вызвать санитарно-эпидемиологическую службу для контроля за изменением концентрации опасных веществ в продуктах горения, и после ликвидации пожара;
- совместно с администрацией объекта определить предельно допустимое время пребывания личного состава на зараженном участке;
- установку пожарных и аварийно-спасательных автомобилей произвести так, чтобы они не попали в зону заражения;
- в зоне заражения тушение пожаров и проведение АСР проводить после получения соответствующего допуска и минимальным количеством личного состава, обеспечив его индивидуальными средствами защиты, соответствующими виду АХОВ, находящемуся на объекте;
- организовать отвод воды в определенное место и принять меры по предотвращению поражения людей и животных отравленной водой;
- после пожара, проведения АСР организовать санитарную обработку личного состава, работавшего в зоне заражения, провести дегазацию специальной одежды, пожарной и аварийно-спасательной техники, пожарно-технического и аварийно-спасательного вооружения и оборудования, провести медицинский осмотр всех участников тушения пожара, проведения АСР.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		144

9.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В рамках данного подраздела рассматриваются специальные нормы трудового законодательства для производства полипропилена, а также организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

9.4.1 Специальные нормы трудового законодательства

В соответствии с перечисленной в предыдущих подразделах информацией производство полипропилена в целом и отделение полимеризации в частности может быть классифицировано как оказывающее вредное воздействие на здоровье человека. Характерными заболеваниями на таком производстве являются хронические и аллергические заболевания органов дыхания, кожи, переднего отрезка глаза. Для профилактики заболеваний подобного рода необходимо проходить профилактические осмотры не реже 2 раз в год.

В соответствии с трудовым кодексом Российской Федерации [77], а именно статьями 92, 117, 147 и 222, работники, задействованные на предприятиях с вредными или опасными производственными факторами, имеют право на следующие льготы:

- сокращение продолжительности рабочего дня;
- предоставление дополнительного оплачиваемого отпуска длительностью не менее 7 календарных дней;
- повышение заработной платы на величину, составляющую не менее 4% от оклада работников, занятых на должностях с нормальными условиями труда;
- организация выдачи молока и лечебно-профилактического питания работникам, занятым на должностях с вредными условиями труда.

Также следует отметить ограничение применения труда женщин и запрет на труд лиц в возрасте до восемнадцати лет на должностях, предполагающих воздействие вредных или опасных факторов производства, в соответствии со статьями 253 и 265 ТК РФ [77].

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		145

9.4.2 Компоновка оборудования

Спецификой химического производства является наличие токсичных, взрывоопасных и др. веществ. Это приводит к тому, что проектировщики стремятся выносить аппаратуру за пределы цеха. Однако существует ряд запретов, обусловленных спецификой производства:

1. Катализаторы Циглера – Натта используют при определенной влажности, поэтому их нельзя выносить за пределы цеха.
2. Есть жидкости, которые имеют высокую температуру кристаллизации. Поэтому они должны размещаться в отапливаемых помещениях.
3. Климатические условия района размещения проектируемого объекта: сильные морозы и ветры, сильные пыльные бури выводят из строя оборудование, которое располагается на открытых площадках.

Таким образом, различают следующие варианты компоновки:

- открытый;
- закрытый;
- смешанный.

На производстве пропилена используется закрытый вариант компоновки оборудования. Все оборудование располагается внутри помещений. В соответствии с нормами и правилами производственные здания имеют прямоугольную форму.

Многопролетные здания должны компоноваться из параллельно расположенных пролетов, ширину и высоту которых следует принимать одинаковыми. Так ширина пролетов одноэтажных и двухэтажных зданий равна 18, 24, 30 м.

Многоэтажные здания следует проектировать шириной не менее 18 м. Шаг колонны составляет 6 и 12 м, высота этажей 4,8 м и 6 м.

Компоновка оборудования включает также проектирование самих помещений:

1. Производственные помещения, в которых располагается основное технологическое оборудование.
2. Прицеховые помещения, где хранится запас того или иного сырья, которое используется для получения полимера.
3. Слесарные мастерские, где производится мелкий ремонт оборудования.
4. Бытовые помещения, гардеробные, помещения для сушки, для обеспыливания одежды, уборная, душевая, курилки.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		146

В основных помещениях предусмотрены отделения для теплового пункта, водоколлекторная, операторные помещения. Также предусмотрены помещения для химических лабораторий.

Производственные здания должны иметь эвакуационные выходы для безопасной эвакуации находящихся в здании людей при возникновении пожара или других аварийных ситуаций. В качестве таких выходов можно использовать проезды, проходы, двери и ворота, устроенные для производственных целей. Как правило, производственное помещение должно иметь не менее двух выходов. Расстояние от наиболее удаленного рабочего места до выхода наружу или на лестничную клетку должно приниматься согласно правилам.

					ФЮРА.061526.001 ПЗ	Лист
						147
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Заключение

В рамках данной дипломной работы был произведен технологический и конструктивно-механический расчет аппарата с перемешивающим устройством и гладкой рубашкой, предназначенного для синтеза полипропилена методом полимеризации в тяжелом растворителе (гептан). В результате произведённых расчетов были определены основные геометрические параметры аппарата, рассчитаны штуцера, фланцевое соединение, опоры, подобраны привод и стойка для перемешивающего устройства, а также выбрана мешалка. По результатам механических расчетов, представленных в разделе 7, можно сделать заключение, что все подобранные элементы конструкции удовлетворяют условиям прочности и устойчивости, вал перемешивающего устройства так же удовлетворяет условиям жесткости и виброустойчивости. В связи с чем, результаты данной работы могут быть применены для построения аппарата и использования его на действующих промышленных предприятиях, специализирующихся на подобной продукции. В качестве примера заинтересованного предприятия можно привести «Томскнефтехим».

В разделе «Финансовый менеджмент» произведен SWOT-анализ и оценен научно-технический эффект и конкурентоспособность данной разработки. Была спланирована реализация проекта, результатом чего стала диаграмма Ганта, в которой отражено время, затраченное на разработку реактора с учетом консультаций научного руководителя.

Помимо вышеуказанного в работе приведён раздел «Социальная ответственность», где отражены рекомендации по безопасной работе персонала с данным аппаратом и рассмотрены вопросы обеспечения охраны окружающей среды.

Список публикаций студента

№ п/п	Наименование работы, ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем работы, с.	Соавторы
а) научные работы					
1	“Биодеструкция донных нефтешламов” (тезисы доклада)	Электрон ный ресурс	Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XVII Международной научно- практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва, посвященной 120-летию Томского политехнического университета, 17–20 мая 2016 г., г. Томск. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — [С. 482-483].	2*	М. С. Полонский, В. В. Желнорович , А. Д. Крошечкин
2	“Полимерный колориметрический сенсор для определения гепарина” (тезисы доклада)	Электрон ный ресурс	Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XVII Международной научно- практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва, посвященной 120-летию Томского политехнического университета, 17–20 мая 2016 г., г. Томск. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — [С. 555-556].	2*	М. С. Полонский, Э. С. Шведская, А. Е Симолина, М. М. Гавриленко,
3	”Исследование свойств и содержания ценных компонентов в золах уноса тепловых электростанций Южно- Африканской	Электрон ный ресурс	Проблемы геологии и освоения недр ; материалы XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова, посвященному 130-летию	3/1	М. С. Полонский, В. В. Желнорович

	республики” (тезисы доклада)		со дня рождения М.И. Кучина, 3-7 апреля 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во: ТПУ, 2017 - Т. 2 - С. 411-413		
4	”Импортозамещающий способ производства модификаторов битума на основе атактического полипропилена” (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Проблемы геологии и освоения недр ; материалы XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова, посвященному 130-летию со дня рождения М.И. Кучина, 3-7 апреля 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во: ТПУ, 2017 - Т. 2 - С. 873-875	3/1	М. С. Полонский, В. В. Желнорович, Р. А. Котомкин
5	”Экономическая и экологическая целесообразность выделения ценных компонентов из зол уноса тепловых электростанций Южно-Африканской республики” (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Перспективы развития фундаментальных наук ; сборник трудов XIV Международной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Том 2.Химия , 25-28 апреля 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во – ТПУ, 2017. — [С. 123-125].	3/2	М. С. Полонский, В. В. Желнорович
6	”Сравнительная оценка различных инициаторов для получения привитых сополимеров на основе атактического полипропилена” (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Перспективы развития фундаментальных наук ; сборник трудов XIV Международной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Том 2. Химия , 25-28 апреля 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во – ТПУ, 2017. — [С. 259-261].	3*	М. С. Полонский, В. В. Желнорович, Р. А. Котомкин
7	”Исследование свойств и содержания ценных компонентов в золах уноса	Электронный ресурс	Химия и химическая технология в XXI веке ; материалы XVIII Международной научно-практической	2/1	М. С. Полонский, В. В. Желнорович

	тепловых электростанций Южно-Африканской Республики” (тезисы доклада)		конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва , 29 мая – 01 июня 2017 г., г. Томск — Томск : Изд-во – ТПУ, 2017. — [С. 406-407].		
8	”Comparative evaluation of different radical initiators, used for production of graft copolymers, based on atactic polypropylene (Сравнительная оценка различных радикальных инициаторов, используемых для получения привитых сополимеров на основе атактического полипропилена)” (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Химия и химическая технология в XXI веке ; материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва , 29 мая – 01 июня 2017 г., г. Томск — Томск : Изд-во – ТПУ, 2017. — [С. 443-444].	2*	М. С. Полонский, В. В. Желнорович, Р. А. Котомкин
9	”Исследование свойств и содержания ценных компонентов в золах уноса тепловых электростанций Южно-Африканской Республики” (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017 : материалы международной научно-практической конференции, Севастополь, 11–15 сентября 2017 г. – Севастополь: Изд-во СевГУ 2017 — [с. 1066-1068]	3/1	Полонский М.С., Желнорович В.А.
б) авторские свидетельства, дипломы, патенты и др.					
10	Диплом за доклад "Исследование свойств и содержания ценных компонентов в золах уноса	Печ.	XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени	2*	М. С. Полонский, В. В. Желнорович

	тепловых электростанций Южно- Африканской Республики"		профессора Л.П. Кулёва, 29 мая – 01 июня 2017 г.		
--	---	--	---	--	--

*Примечание: * – работа с неразделенным авторством*

Список использованных источников

1. Белокурова, А.П. Химия и технология получения полиолефинов: учебное пособие / А.П. Белокурова, Т.А. Агеева; под ред. О.И. Койфмана. Иван. гос. хим.-технолог. ун-т. — Иваново, 2011. — 126 с.
2. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения. Строение вещества. Физические свойства важнейших веществ. Ароматические соединения. Химия фотографических процессов. Номенклатура органических соединений. Техника лабораторных работ. Основы технологии. Интеллектуальная собственность. — Санкт-Петербург: Професионал, 2006. — 1464 с.: ил. — Библиогр.: с. 1099-1100.
3. Пособие по химии для поступающих в Сибирский государственный медицинский университет и другие высшие медицинские учебные заведения. Ч. 3–4: учебное пособие / И. Л. Филимонова, А. С. Галактионова, О. Ф. Прищепова, О. А. Ерофеева, М. С. Юсубов. — Томск: Изд-во Оптимум, 2013. — 204 с.
4. Полипропилен: перевод со словацкого / И. Амброж [и др.]; под ред. В. И. Пилиповского, И. К. Ярцева. — Ленинград: Химия, 1967. — 316 с.: ил. — Доп. тит. лист на словацком языке. — Авт. указаны на обороте тит. листа. — Библиогр. в конце гл.
5. Потехин, Вячеслав Матвеевич. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник / В. М. Потехин, В. В. Потехин. — 3-е изд., испр. и доп.. — Санкт-Петербург: Лань, 2014. — 887 с.: ил.
6. Капкин, Владимир Дмитриевич. Технология органического синтеза: учебник / В. Д. Капкин, Г. А. Савинецкая, В. И. Чапурин. — Москва: Химия, 1987. — 400 с.
7. Энциклопедия полимеров в 3 т.: Т. 1: А-К. — Москва: Советская энциклопедия, 1972. — 1224 стб.: ил. — Библиогр. в конце ст. — Алф.-предм. указ.: с. 1197-1224.
8. Полипропилен 2016 [Электронный ресурс] / Пост-релиз конференции «Полипропилен 2016». — Москва, 2016. URL: <http://www.creonenergy.ru/consulting/detailConf.php?ID=116792> (дата обращения: 23.04.2018).
9. Эффективная практика глубокой переработки газового сырья в химическую продукцию на предприятиях ПАО "Сибур холдинг" и используемые технологические процессы / Ю. М. Казаков [и др.]. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — 148 с.
10. Волкова, А.В. Рынок крупнотоннажных полимеров. Часть II. Полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат / А.В. Волкова. Санкт-Петербург: Изд-во НИУ ВШЭ, 2016. — 81 с.

11. ГОСТ 9931-85 Корпуса цилиндрические стальных сварных сосудов и аппаратов. Типы, основные параметры и размеры (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1988. — 54 с. — Государственные стандарты.
12. Уайт, Дж. Л.. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины : пер. с англ. / Дж. Л. Уайт, Д. Д. Чой. — СПб.: Профессия, 2006. — 256 с.: ил.
13. Савада, Хидео. Термодинамика полимеризации : монография : пер. с англ. / Х. Савада. — Москва: Химия, 1979. — 312 с.: граф.. — Пер. изд.: Thermodynamics of polymerization. — Библиогр. в конце глав. — Предм. указ.: с. 311-312.
14. Азаров, В. И.. Химия древесины и синтетических полимеров. — Москва: Лань, 2010. — Допущено УМО по образованию в области лесного дела в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по направлению 240400 — «Химическая технология органических веществ и топлива» по специальности 240406 — «Технология химической переработки древесины» (№ 44 от 16.03.2009 г.).
15. Андреас, Фридрих. Химия и технология пропилена : пер. с нем. / Ф. Андреас, К. Греббе. — Ленинград: Химия, 1973. — 367 с.: ил.. — Библиография в конце разделов.
16. Бесков, Владимир Сергеевич. Общая химическая технология и основы промышленной экологии : учебник / В. С. Бесков, В. С. Сафронов. — Москва: Химия, 1999. — 470 с.
17. Голубятников, Владимир Алексеевич. Автоматизация производственных процессов и АСУП в химической промышленности: учебник / В. А. Голубятников, В. В. Шувалов. — Москва: Химия, 1978. — 375 с.: ил.. — Автоматизация химических производств. — Библиогр.: с. 366-375.
18. Фёдоров, Анатолий Фёдорович. Системы управления химико-технологическими процессами: учебное пособие для вузов / А. Ф. Фёдоров, Е. А. Кузьменко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2011. — 224 с.: ил.. — Библиогр.: с. 222-223.
19. Беляев В. М., Расчёт и конструирование основного оборудования отрасли. Часть I. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами: учебное пособие / В. М. Беляев, В. М. Миронов, В. В. Тихонов. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 92 с.
20. Перри, Джон Г.. Справочник инженера-химика : пер. с англ. : в 2 т. / Д. Г. Перри; под ред. Н. М. Жаворонкова. — Ленинград: Химия, 1969.
21. ГОСТ 20680-2002 Аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Общие технические условия. — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 49 с. — Государственные стандарты.

22. РД 26-01-90-85 Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. — Изд. офиц. Л.: РТП ЛенНИИхиммаша, 1987 год. — 58 с. — Руководящие документы.

23. АТК 24.201.17-90 Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования. — Изд. офиц. М.: Министерство тяжелого машиностроения СССР, 1991 год. — 49 с. — Альбомы типовых конструкций.

24. Лащинский, А. А.. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский. — Москва; Ленинград: Машгиз, 1963. — 464 с.: ил.. — Библиогр.: с. 465-468.

25. Павлов, Константин Феофанович. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. — 14-е изд., стер.. — Москва: Альянс, 2007. — 576 с.: ил.. — Библиогр.: с. 502-509.

26. Пахомов, Владимир Сергеевич. Коррозия металлов и сплавов : справочник : в 2 кн. / В. С. Пахомов. — Москва: Наука и технологии, 2013.

27. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию : учебное пособие / под ред. Ю. И. Дытнерского. — Изд. стер.. — Москва: Альянс, 2015. — 493 с.: ил., черт.

28. АТК 24.218.06-90 Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования. — Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры» (АО ЦКБН), 1995. — 46 с. — Альбомы типовых конструкций.

29. Беляев, Василий Михайлович. Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли учебное пособие: Ч. 1: Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств / В. М. Беляев, В. М. Миронов; Томский политехнический университет (ТПУ), Институт дистанционного образования (ИДО). — Томск : Изд-во ТПУ , 2003. — 168 с.: ил. — Библиогр.: с. 165.

30. ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 65 с. — Государственные стандарты.

31. ГОСТ Р 52857.1-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 43 с. — Государственные стандарты.

32. ГОСТ 10007-80 Фторопласт-4. Технические условия (с Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 38 с. — Государственные стандарты.

33. ГОСТ Р 52857.2-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и

крышек. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 36 с. — Государственные стандарты.

34. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : учебное пособие для вузов / М. Ф. Михалев [и др.]; под ред. М. Ф. Михалева. — 2-е изд., испр. и доп.. — Москва: АРИС, 2010. — 310 с.: ил.

35. ГОСТ 6533-78 Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры (с Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1985. — 115 с. — Государственные стандарты.

36. ГОСТ Р 52857.8-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты с рубашками. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 134 с. — Государственные стандарты.

37. ГОСТ 28759.2-90 Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2005. — 49 с. — Государственные стандарты.

38. ГОСТ Р 52857.4-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 121 с. — Государственные стандарты.

39. Краткий справочник по машиностроительным материалам / под ред. В. М. Раскатова. — Москва: Машгиз, 1963. — 440 с.: ил.

40. ГОСТ Р 52857.5-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 89 с. — Государственные стандарты.

41. ГОСТ 26296-84 (СТ СЭВ 4349-83) Лапы опорные подвесных вертикальных сосудов и аппаратов. Основные размеры (с Поправкой, с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1984. — 44 с. — Государственные стандарты.

42. Расчёт химического аппарата с механическим перемешивающим устройством: Методические указания / Сост: Л. Н. Аксенов, Н. Н. Лясникова, С. А. Кунавин, Е. С. Соколов-Бородкин, В. Ф. Хвостов, В. Н. Чечко. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. — 88 с.

43. Конструирование и расчёт элементов оборудования отрасли. Ч. II. Толстостенные сосуды и вращающиеся детали / сост. В.М. Беляев; Томский политехнический университет. — 2-е изд., испр. и доп. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. — 196 с.

44. Алгоритм расчета на виброустойчивость валов механических перемешивающих устройств: Методические указания к применению вычислительной техники в курсе "Расчет и

конструирование машин и аппаратов химических производств" для студентов специальностей 0516, 0558 всех форм обучения / Сост.: В.Г. Доброногов, О.Г. Зубрий, Л.Г. Воронин. — К.: КПИ, 1988. — 52 с.

45. Сопромат Гуру. Расчёт балки онлайн. Построение эпюр [Электронный ресурс]: офиц. сайт. — Москва, 2002. — Схема доступа: <https://sopromatguru.ru/> (дата обращения: 21.04.2018).

46. ГОСТ Р 52857.3-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 48 с. — Государственные стандарты.

47. ГОСТ 23360-78 Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шпоночные с призматическими шпонками. Размеры шпонок и сечений пазов. Допуски и посадки (с Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. — 21 с. — Государственные стандарты.

48. Куклин, Николай Григорьевич. Детали машин: учебник для техникумов / Н. Г. Куклин, Г. С. Куклина. — Москва: Высшая школа, 1973. — 382 с.: ил.

49. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницына; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 36 с.

50. ООО Экотех-НН Химпром [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Дзержинск, 2009. URL: <http://htpnn.ru> (дата обращения: 17.03.2018).

51. ОАО НИИПТхиммаш [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Пенза, 2005. URL: <http://niihim.ru> (дата обращения: 17.03.2018).

52. Торгово-промышленная компания «Стелла» [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Москва, 2009. URL: <https://tpk-stella.com> (дата обращения: 23.03.2018).

53. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 22 с. — Государственные стандарты.

54. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 123 с. — Государственные стандарты.

55. Корольченко, А. Я.. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник / А. Я. Корольченко, Д. А. Корольченко. — 2-е изд., перераб. и доп.. — Москва: Пожнаука, 2004. — 739 с.
56. ГОСТ 25070-2013 Этилен. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 32 с. — Государственные стандарты.
57. ГОСТ 25043-2013 Пропилен. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 41 с. — Государственные стандарты.
58. ГОСТ Р 51673-2000 Водород газообразный чистый. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. — 56 с. — Государственные стандарты.
59. ГОСТ 25828-83 Гептан нормальный эталонный. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2009. — 8 с. — Государственные стандарты.
60. ГОСТ 5208-2013 Спирт бутиловый нормальный технический. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2014. — 72 с. — Государственные стандарты.
61. ГОСТ 857-95 Кислота соляная синтетическая техническая. Технические условия (с Поправкой). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. — 35 с. — Государственные стандарты.
62. ГОСТ Р 55064-2012 Натр едкий технический. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2013. — 74 с. — Государственные стандарты.
63. ГОСТ 9293-74 (ИСО 2435-73) Азот газообразный и жидкий. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправкой). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2007. — 63 с. — Государственные стандарты.
64. ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 12 с. — Государственные стандарты.
65. Технический регламент Таможенного союза "О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением" (ТР ТС 032/2013) [Электронный ресурс] / Официальный сайт Евразийской экономической комиссии, 2013. URL: https://docs.eaeunion.org/docs/ru-ru/0123437/cncd_03072013_41 (дата обращения 25.03.2018).
66. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2010. — 53 с. — Государственные стандарты.

67. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2015. — 51 с. — Государственные стандарты.

68. ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2010. — 56 с. — Государственные стандарты.

69. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. — Изд. офиц. Москва: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. — 48 с. — Санитарные правила и нормы.

70. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. — Изд. офиц. Москва: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. — 52 с. — Санитарные правила и нормы.

71. Институт промышленной безопасности, охраны труда и социального партнёрства [Электронный ресурс]: офиц. сайт. Санкт-Петербург, 2004. Схема доступа: <https://www.safework.ru> (дата обращения: 07.05.2018).

72. О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов" (с изменениями на 25 апреля 2014 года). — Москва: федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. — 69 с. — Постановления.

73. Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений". — Москва: федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2017. — 45 с. — Постановления.

74. ГН 2.1.5.2280-07. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Дополнения и изменения 1 к ГН 2.1.5.1315-03. ГН 2.1.5.2280-07 / Российская Федерация, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор). — Изд. офиц., Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. — 11 с.

75. ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 44 с. — Государственные стандарты.

76. ГОСТ Р 22.3.03-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения. — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1995. — 23 с. — Государственные стандарты.

77. Трудовой кодекс Российской Федерации. — Москва: ВИТРЭМ, 2002. — 192 с.

**Приложение А Расчётная модель реактора для синтеза полипропилена для
осуществления механического расчёта аппарата
(справочное)**

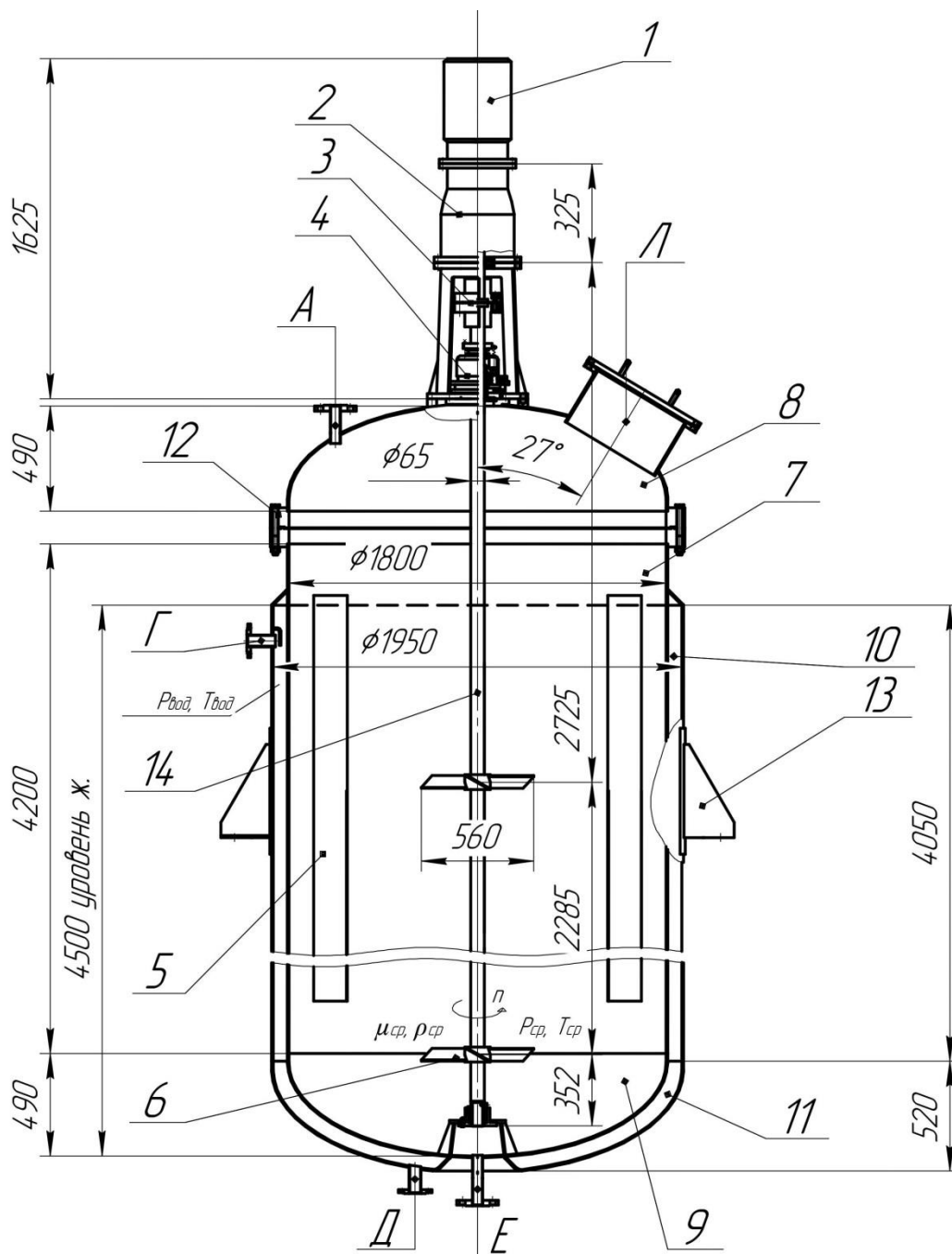


Рисунок А.1 – Расчётная модель реактора для синтеза полипропилена, главный вид

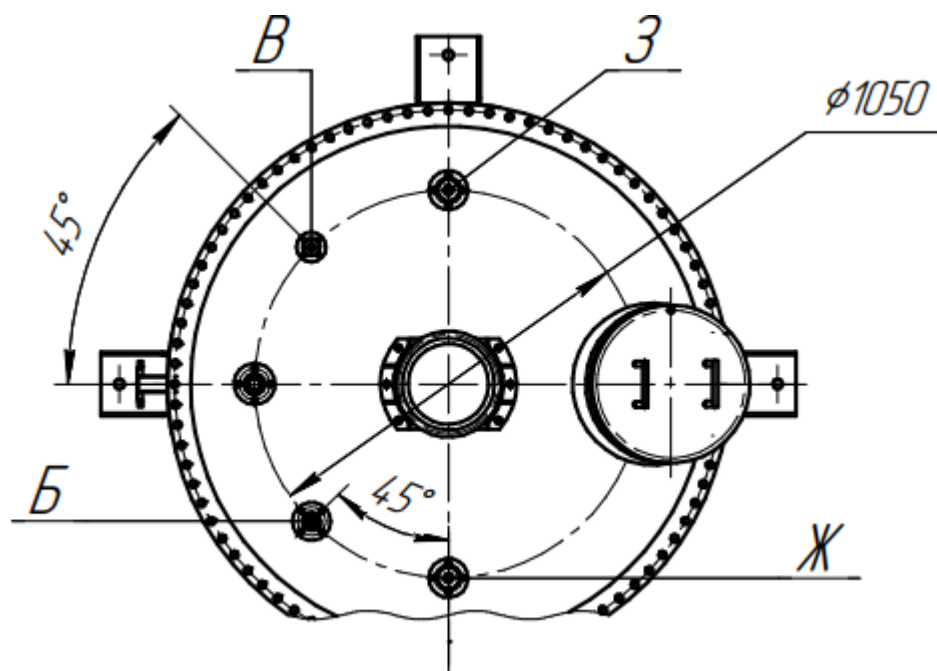


Рисунок А.2 – Расчётная модель реактора для синтеза полипропилена, вид сверху

где 1 – мотор редуктор типа ВО; 2 – стойка привода типа I с концевой опорой; 3 – муфта втулочно-пальцевая; 4 – уплотнение торцевое; 5 – отражательная перегородка; 6 – мешалка трёхлопастная; 7 – цилиндрическая обечайка корпуса, 8 – эллиптическая крышка корпуса, 9 – эллиптическое днище корпуса, 10 – цилиндрическая обечайка рубашки, 11 – эллиптическое днище рубашки, 12 – фланец типа шип-паз, 13 – опорная лапа; 14 – вал однопролётный; А – штуцер для ввода полипропилена в реактор, Б – штуцер для ввода гептана в реактор, В – штуцер для ввода каталитического комплекса в реактор, Г – штуцер для ввода воды в рубашку аппарата, Д –штуцер для отвода воды из рубашки аппарата, Е – штуцер для отвода суспензии полипропилена из реактора, Ж – штуцер для установки датчика давления, З – штуцер для установки датчика температуры; Л – люк-лаз.

Параметры среды в аппарате:

- динамическая вязкость, $\text{мПа}\cdot\text{с}$, $\mu_{\text{ср}} = 0,842$;
- плотность, кг/м^3 , $\rho_{\text{ср}} = 776,47$;
- избыточное давление, МПа , $p_{\text{ср}} = 0,7$;
- температура, $^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ср}} = 70$.

Параметры теплоносителя в рубашке:

- избыточное давление, МПа , $p_{\text{пар}} = 0,1$;
- температура, $^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{пар}} = 25$.

Частота вращения мешалки, об/мин , $n = 180$.

**Приложение Б График выполнения ВКР
(обязательное)**

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера

Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Профиль Машины и аппараты химических производств

Уровень образования Бакалавриат

Период выполнения весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.02.2018	Обзор литературы	5
11.03.2018	Технологическая схема установки по производству полипропилена	5
23.03.2018	Технологические расчеты реактора для синтеза полипропилена	5
01.04.2018	Выбор конструкционных материалов	3
18.04.2018	Механический расчет реактора синтеза полипропилена	12
25.04.2018	Поверочный расчет реактора синтеза полипропилена	5
12.05.2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	5
18.05.2018	Социальная ответственность	5
20.05.2018	Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена	3
25.05.2018	Чертежи и демонстрационные плакаты	32
27.05.2018	Оформление пояснительной записки*	20
	Всего	100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Краснокутская Е.А.	Д.Х.Н.		